



Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrion
Facultad de Ingeniería Agraria, Industrias Alimentarias y Ambiental
Escuela Profesional de Ingeniería en Industrias Alimentarias

Validación sensorial de técnicas de medición de color en alimentos horneados de panificación utilizando colorimetría y visión por computadora

Tesis
Para optar el Título Profesional de Ingeniero en Industrias Alimentarias

Autoras
Lisset Paola Martínez Jaime
Rosa Katherine Sánchez De Paz

Asesor
Mtro. Edson Max Caro Degollar



Huacho – Perú
2026



Reconocimiento - No Comercial-Sin Derivadas - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Reconocimiento: Debe otorgar el crédito correspondiente, proporcionar un enlace a la licencia e indicar si se realizaron cambios. Puede hacerlo de cualquier manera razonable, pero no de ninguna manera que sugiera que el licenciante lo respalda a usted o su uso. **No Comercial:** No puede utilizar el material con fines comerciales.

Sin Derivadas: Si remezcla, transforma o construye sobre el material, no puede distribuir el material modificado. **Sin restricciones adicionales:** No puede aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros de hacer cualquier cosa que permita la licencia.



UNIVERSIDAD NACIONAL JOSÉ FAUSTINO SÁNCHEZ CARRIÓN

LICENCIADA

(Resolución de Consejo Directivo N° 012-2020-SUNEDU/CD de fecha 27/01/2020)

Facultad de Ingeniería Agraria, Industrias Alimentarias y Ambiental

Escuela Profesional de Ingeniería en Industrias Alimentarias

METADATOS:

DATOS DEL AUTOR (ES):		
APELLIDOS Y NOMBRES	DNI	FECHA DE SUSTENTACIÓN
Martinez Jaime, Lisset Paola	75105827	16-07-2026
Sanchez De Paz, Rosa Katherine	71520760	16-07-2026
DATOS DEL ASESOR:		
APELLIDOS Y NOMBRES	DNI	CÓDIGO ORCID
Caro Degollar, Edson Max	45593669	https://orcid.org/0000-0001-7156-6691
DATOS DE LOS MIEMBROS DE JURADOS – PREGRADO:		
APELLIDOS Y NOMBRES	DNI	CÓDIGO ORCID
Vasquez Clavo, Guillermo Napoleon	06100596	https://orcid.org/0000-0001-5909-5372
Fernandez Herrera, Fredesvindo	40588728	https://orcid.org/0000-0003-2973-7973
Bustamante Bustamante, Felix	44229029	https://orcid.org/0000-0001-9061-1718

2026-042228 Sánchez De Paz Rosa Katherine 2026-...

VALIDACIÓN SENSORIAL DE TÉCNICAS DE MEDICIÓN DE COLOR EN ALIMENTOS HORNEADOS DE PANIFICACIÓN UTI...

UTI-FIASAya PREGRADO 2026
Unidad de Investigación FIASAya 2026
Facultad de Ingeniería Agrarias, Industrias Alimentarias y Ambiental

Detalles del documento

Identificador de la entrega
tmsid:1-2596616694

Fecha de entrega
17 jun 2026, 3:15 p.m. GMT-5

Fecha de descarga
17 jun 2026, 3:22 p.m. GMT-5

Nombre del archivo
Barrador_de_Tesis_-_Pazla_y_Rosa-3.pdf

Tamaño del archivo
3.2 MB

127 páginas
27.39k palabras
540.414 caracteres

turnitin Página 1 de 139 - Portada

Identificador de la entrega: tmsid:1-2596616694

turnitin Página 2 de 139 - Descripción general de metodología

Identificador de la entrega: tmsid:1-2596616694

16% Similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para ca...

Filtrado desde el informe

► Coincidencias menores (menos de 5 palabras)

Fuentes principales

15% Fuentes de Internet
8% Publicaciones
9% Trabajos entregados (trabajos del estudiante)

Marcas de integridad

Nº de alertas de integridad para revisión

No se han detectado manipulaciones de texto sospechosas.

Los algoritmos de nuestro sistema funcionan en constante actualización en profundidad para buscar similitudes que permitan el diagnóstico de una entrega original. Si advertimos algo extraño, lo marcamos como una alerta para que puedas revisarla.

Una marca de alerta no es una declaración de integridad de problemas. Sin embargo, recomendamos que preste atención y la revise.

DEDICATORIA

A Dios, por ser la luz que guía cada uno de mis pasos y por darme la fortaleza necesaria para superar cada obstáculo.

A mi madre, por su amor incondicional, su apoyo constante y por ser mi mayor inspiración. Gracias por enseñarme con tu ejemplo el valor del esfuerzo y la perseverancia. Este logro también es tuyo.

A todas las personas que me acompañaron en este camino y que, con su apoyo y confianza, hicieron posible alcanzar esta meta.

Sánchez De Paz Rosa Katherine

A mi abuelo Felicito, quien sembró en mí el amor por el estudio y el deseo de superación. Lo logramos, abuelo.

A mis abuelos, por su cariño y por guiarme siempre en el camino.

A mis padres, Ysmael y Carolina, por su amor incondicional, sus sacrificios y por nunca dejar de creer en mí. Este logro también es suyo.

A mi familia, especialmente a mis hermanas, por su apoyo, sus consejos y por acompañarme en cada paso.

Martínez Jaime Lisset Paola

AGRADECIMIENTO

Expreso mi más sincero agradecimiento a Dios, por darme la fortaleza y la sabiduría necesarias para culminar esta etapa tan importante de mi vida.

A mi madre, por su apoyo incondicional, su paciencia y por estar siempre a mi lado en cada momento difícil. Gracias por confiar en mí y motivarme a seguir adelante.

Al asesor de esta tesis, por su orientación, apoyo y valiosas enseñanzas durante el desarrollo de este trabajo.

Al honorable jurado, por su tiempo, evaluación y aportes que contribuyeron a mejorar la calidad de la presente investigación.

A todas las personas que formaron parte de este proceso y que contribuyeron, directa o indirectamente, a que este logro sea posible.

Sánchez De Paz Rosa Katherine

Agradezco a Dios por guiarme y darme la fortaleza necesaria para alcanzar esta meta.

A mi familia, por su apoyo incondicional, por sus sacrificios y por acompañarme siempre en este camino.

Al asesor de la tesis, por su guía, dedicación y apoyo constante en el desarrollo de este trabajo.

Al honorable jurado, por sus observaciones, recomendaciones y por el tiempo brindado en la evaluación de esta investigación.

A todas las personas que, de una u otra forma, formaron parte de este proceso y dejaron una huella en mi vida

Martínez Jaime Lisset Paola

ÍNDICE

DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
RESUMEN	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1. Descripción de la realidad problemática	3
1.2. Formulación del problema	5
1.2.1 Problema general	5
1.2.2 Problemas específicos	5
1.3. Objetivos de la investigación	6
1.3.1 Objetivo general	6
1.3.2 Objetivos específicos	6
1.4. Justificación de la investigación	7
1.4.1. Justificación teórica	7
1.4.2. Justificación metodológica	7
1.4.3. Justificación práctica	8
1.4.4. Justificación social y económica	8
1.5. Delimitaciones del estudio	9
1.5.1. Delimitación Temática	9
1.5.2. Delimitación Espacial	9
1.5.3. Delimitación Temporal	9
1.5.4. Delimitación Metodológica	9
1.5.5. Delimitación Conceptual	10
CAPITULO II. MARCO TEORICO	11
2.1 Antecedentes de la investigación	11
2.1.1 Investigaciones internacionales	11
2.1.2 Investigaciones nacionales	13
2.2 Bases teóricas	16

2.2.1	Importancia del Color en Productos Alimentarios	16
2.2.2	Métodos de Evaluación del Color en Productos Horneados	17
2.2.2.1	Colorimetría Tradicional	17
2.2.2.2	Visión por Computadora	17
2.2.3	Factores que afectan el desarrollo del color en productos horneados	18
2.2.3.1	Reacción de Maillard y Caramelización	18
2.2.3.2	Influencia de las Condiciones de Horneado	18
2.2.4	Aplicaciones de la Visión por Computadora en la Industria Alimentaria	19
2.3	Definición de términos básicos	19
2.4	Hipótesis de investigación	21
2.4.1	Hipótesis general	21
2.4.2	Hipótesis específicas	21
2.5	Operacionalización de las variables	22
CAPITULO III. METODOLOGÍA		24
3.1	Diseño metodológico	24
3.1.1	Tipo de Investigación	24
3.1.2	Nivel de la Investigación	25
3.1.3	Diseño de la Investigación	25
3.1.4	Enfoque de la Investigación	30
3.2	Población y muestra	30
3.2.1	Población	30
3.2.2	Muestra	31
3.3	Técnicas de recolección de datos	32
3.3.1	Procedimiento experimental	34
3.4	Técnicas para el procesamiento de la información	42
CAPITULO IV. RESULTADOS		45
4.1	Resultados de la medición del color de la corteza mediante colorimetría tradicional	45
4.1.1	Parámetro L* (luminosidad)	47
4.1.2	Parámetro a* (componente rojo-verde)	48
4.1.3	Parámetro b* (componente amarillo-azul)	48
4.2	Resultados de la medición del color de la corteza de pan mediante visión por computadora	49
4.3	Comparación estadística entre colorimetría tradicional y visión por computadora para corteza de muestras de pan y galleta	52
4.3.1	Relación entre métodos (correlación)	52

4.3.2	Concordancia entre métodos (Bland–Altman) en muestras de corteza de pan y galleta.	54
4.3.3	Síntesis de la comparación entre métodos	58
4.4	Validación sensorial de la representación del color de la corteza	59
4.5	Resultados de la medición del color de la miga mediante colorimetría tradicional	61
4.6	Resultados de la medición del color de la miga de pan mediante visión por computadora	65
4.7	Comparación estadística entre colorimetría tradicional y visión por computadora para la miga de muestras de pan	68
4.7.1	Relación entre métodos (correlación)	69
4.7.2	Concordancia entre métodos (Bland–Altman) en muestras de miga	72
4.7.3	Validación sensorial de la representación del color de la miga	77
4.8	Resultados de la comparación del comportamiento del color en distintos tipos de pan bajo condiciones de horneado controladas	80
4.8.1	Resultados obtenidos en el pan francés	80
4.8.2	Resultados obtenidos en el pan ciabatta	85
4.8.3	Resultados obtenidos en el pan árabe	90
CAPITULO V. DISCUSIONES		96
CAPITULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES		101
6.1	Conclusiones	101
6.2	Recomendaciones	102
CAPITULO VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		104
ANEXOS		108

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar la relación entre la colorimetría tradicional y la visión por computadora en la medición del color en productos de panificación, así como determinar la influencia de las condiciones de horneado en la variación cromática de la corteza del pan. El estudio se desarrolló bajo un enfoque cuantitativo, de tipo correlacional, con diseño no experimental y transversal, estructurado en tres experimentos. En el primero se comparó el color de la corteza de diez productos de panificación (PAN1 a PAN10) mediante colorímetro y visión por computadora, incorporando la elección de consumidores. En el segundo se evaluó el color de la miga en las mismas muestras, excluyendo la galleta por no presentar miga, incluyendo también la preferencia de consumidores. En el tercer experimento se analizaron panes francés, ciabatta y árabe bajo cuatro tratamientos de horneado (150°C–20 min, 150°C–40 min, 180°C–20 min y 180°C–40 min), evaluando la variación del color sin participación de consumidores. Las mediciones cromáticas se realizaron en el espacio CIELAB (L^* , a^* , b^*) mediante colorímetro NH310 y visión por computadora, utilizando procesamiento digital de imágenes en Python. El análisis estadístico incluyó correlaciones, prueba de chi-cuadrado para la elección de consumidores y prueba de Tukey para evaluar diferencias significativas entre tratamientos de horneado. Los resultados evidenciaron una correlación significativa entre ambos métodos de medición del color, con alta concordancia en la corteza y la miga, y una preferencia mayoritaria de los consumidores por las representaciones obtenidas mediante visión por computadora. Asimismo, el análisis de Tukey mostró que el incremento de la temperatura y el tiempo de horneado reduce la luminosidad (L^*) y aumenta los valores de a^* y b^* , confirmando la influencia del proceso térmico en la coloración del pan. Se concluye que la visión por computadora es una alternativa válida y eficiente para la medición del color en productos de panificación y que las condiciones de horneado influyen significativamente en la variación cromática del pan.

Palabras clave: *colorimetría, visión por computadora, panificación, color CIELAB, horneado, análisis de color.*

ABSTRACT

The present research aimed to evaluate the relationship between traditional colorimetry and computer vision in color measurement of bakery products, as well as to determine the influence of baking conditions on crust color variation. The study was conducted under a quantitative and correlational approach, with a non-experimental and cross-sectional design, structured into three experiments. The first experiment compared crust color in ten bakery products (PAN1 to PAN10) using a colorimeter and computer vision, including consumer choice. The second experiment evaluated crumb color in the same samples, excluding cookies due to the absence of crumb, also incorporating consumer preference. The third experiment analyzed French bread, ciabatta, and Arabic bread under four baking treatments (150°C–20 min, 150°C–40 min, 180°C–20 min, and 180°C–40 min), evaluating color variation without consumer participation. Color measurements were performed in the CIELAB (L^* , a^* , b^*) color space using an NH310 colorimeter and computer vision through digital image processing in Python. Statistical analysis included correlations, chi-square test for consumer choice, and Tukey test to evaluate significant differences among baking treatments. The results showed a significant correlation between both color measurement methods, with high agreement in crust and crumb evaluations, and a greater consumer preference for color representations obtained through computer vision. Furthermore, Tukey analysis demonstrated that increasing baking temperature and time reduces luminosity (L^*) and increases a^* and b^* values, confirming the influence of thermal processing on bread coloration. It is concluded that computer vision is a valid and efficient alternative for color measurement in bakery products and that baking conditions significantly affect bread color variation.

Keywords: *colorimetry, computer vision, bakery products, CIELAB color, baking, color analysis.*

INTRODUCCIÓN

El color es uno de los atributos más importantes en la percepción de calidad de los productos alimenticios, especialmente en los productos horneados, donde influye directamente en la aceptación del consumidor. En la industria de panificación, el color de la corteza del pan está estrechamente asociado con su grado de cocción, sabor, textura y valor comercial. Sin embargo, la evaluación del color suele realizarse de manera subjetiva o mediante métodos instrumentales tradicionales, como la colorimetría, que aunque precisos, pueden ser costosos y de limitada aplicabilidad en procesos industriales de gran escala.

En las últimas décadas, la visión por computadora (VC) ha emergido como una herramienta poderosa para la evaluación objetiva del color, forma y textura de los alimentos. Su aplicación permite analizar imágenes digitales capturadas bajo condiciones controladas, transformando la información visual en datos cuantificables dentro de espacios de color como RGB o CIELAB. Este tipo de tecnología no solo reduce el tiempo y los costos de análisis, sino que también posibilita una evaluación no destructiva y automatizada del producto, lo cual resulta ideal para líneas de producción continua.

El color de los productos horneados está determinado por fenómenos fisicoquímicos como la reacción de Maillard y la caramelización, los cuales dependen del tiempo y la temperatura de horneado. Estos procesos generan pigmentos responsables de las tonalidades doradas o marrones características de la corteza. Por tanto, una medición precisa del color puede ser un indicador confiable del grado de cocción, la uniformidad del horneado y, en consecuencia, de la calidad final del producto.

Pese a los avances tecnológicos, aún existen pocas investigaciones que comparen directamente la precisión de la visión por computadora frente a la colorimetría tradicional

en la evaluación del color de productos horneados. En este contexto, el presente estudio busca establecer una correlación entre ambos métodos, evaluando la capacidad de la visión por computadora para reproducir los resultados obtenidos mediante instrumentos colorimétricos convencionales.

El objetivo principal de esta investigación es determinar la relación entre las mediciones de color obtenidas por visión por computadora y por colorimetría tradicional en productos horneados, tomando como modelo distintos tipos de pan sometidos a diferentes condiciones de tiempo y temperatura de cocción. Además, se busca validar la precisión de la visión por computadora como herramienta complementaria o alternativa para el control de calidad en la industria panificadora.

La relevancia de este estudio radica en su potencial para optimizar los procesos de control de color en panificación, aportando una metodología accesible, reproducible y sostenible. La posibilidad de utilizar visión por computadora permite integrar sistemas automáticos de monitoreo que mejoren la estandarización del color, la eficiencia del proceso y la satisfacción del consumidor. Asimismo, los resultados obtenidos servirán como base científica para futuras investigaciones en la aplicación de tecnologías ópticas e inteligencia artificial en el análisis de alimentos.

Esta tesis propone una comparación integral entre dos métodos de medición del color visión por computadora y colorimetría tradicional con el fin de validar su concordancia, determinar su precisión y explorar su aplicabilidad práctica en la evaluación de productos horneados. El estudio busca contribuir al desarrollo de herramientas tecnológicas más eficientes para el control de calidad alimentaria, impulsando la modernización de la industria panadera a través de la innovación científica y tecnológica.

CAPITULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción de la realidad problemática

El color es un atributo fundamental en la evaluación de la calidad de los alimentos, ya que influye directamente en la percepción del consumidor y en la aceptación del producto final. En la industria de panificación, la medición del color es un aspecto crítico, pues permite monitorear el nivel de cocción, identificar defectos y garantizar la homogeneidad del producto. Sin embargo, medir el color de manera objetiva y precisa en productos horneados representa un desafío, debido a su textura heterogénea, la formación de costras y la variabilidad generada por reacciones químicas como la reacción de Maillard y la caramelización (Pathare et al., 2013; Wu & Sun, 2013).

Los métodos tradicionales para la medición del color en la industria alimentaria han estado dominados por los colorímetros de tres estímulos, que utilizan un sistema de medición puntual para cuantificar los valores de color en el espacio CIELAB (L^* , a^* , b^*). No obstante, estos dispositivos presentan limitaciones significativas, especialmente cuando se aplican a superficies heterogéneas y no uniformes, como las de los productos horneados. Su falta de resolución espacial y su incapacidad para analizar el color de un área amplia del producto pueden llevar a resultados poco representativos, especialmente en productos con variabilidad de tonalidades en una misma muestra (Goñi & Salvadori, 2017; Tomasevic et al., 2019).

Ante estas limitaciones, la visión por computadora ha surgido como una alternativa innovadora y más robusta para la evaluación del color en alimentos. Esta tecnología

permite capturar y analizar imágenes de alta resolución, obteniendo información detallada del color en toda la superficie del producto, en lugar de hacerlo en puntos específicos. Además, ofrece la ventaja de reducir la variabilidad en las mediciones y mejorar la reproducibilidad (Yagiz et al., 2009; Watkins et al., 2024).

Sin embargo, existe un vacío de conocimiento en la aplicación de esta tecnología en la panificación. La mayoría de los estudios realizados hasta la fecha se han enfocado en alimentos como carnes, pescados y frutas, dejando un área poco explorada en la evaluación del color en productos horneados (Ling et al., 1996; Oliveira & Balaban, 2006). Además, no se ha establecido un estándar para correlacionar las mediciones obtenidas mediante visión por computadora con la percepción sensorial del consumidor, lo que es clave para validar su aplicabilidad en la industria alimentaria (Ünal et al., 2019).

Otro aspecto crítico que aún no ha sido suficientemente estudiado es cómo las condiciones de horneado (tiempo y temperatura) afectan la medición del color cuando se comparan ambas técnicas. Si bien se sabe que tiempos de horneado más largos y temperaturas más altas conducen a un color más oscuro debido a la caramelización y la reacción de Maillard, no se ha determinado si los colorímetros y los sistemas de visión por computadora responden de manera similar ante estas variaciones (Tomasevic et al., 2019). Esta falta de información limita la implementación de sistemas de control de calidad automatizados en la panificación y dificulta la adopción de nuevas tecnologías que permitan una evaluación más precisa y eficiente del color.

Dado este contexto, es necesario validar la correspondencia entre las mediciones de color realizadas con visión por computadora y colorímetros tradicionales en productos de panificación, asegurando que ambas técnicas proporcionen datos consistentes y representativos del color real del producto. Además, es fundamental determinar la relación entre la percepción sensorial del color y las mediciones instrumentales, para establecer una metodología confiable que pueda ser aplicada en la industria de panificación.

A partir de estos antecedentes, se plantea la necesidad de llenar estos vacíos mediante un estudio comparativo entre la visión por computadora y la colorimetría tradicional en productos horneados, proporcionando información clave para mejorar el control de calidad en la panificación.

1.2. Formulación del problema

1.2.1 Problema general

¿Cómo se correlacionan las mediciones instrumentales de color obtenidas mediante visión por computadora y colorimetría tradicional con la percepción sensorial del consumidor en productos horneados de panificación?

1.2.2 Problemas específicos

¿Cuáles son las diferencias entre los valores de color (L^* , a^* , b^* y ΔE) obtenidos mediante visión por computadora y los obtenidos con colorimetría tradicional en productos horneados?

¿Cuál es la relación entre las mediciones de color obtenidas por visión por computadora y colorimetría tradicional con la percepción sensorial del color en productos de panificación?

¿Cómo influyen las condiciones de horneado (tiempo y temperatura) en la variación del color medido con ambas técnicas?

1.3. Objetivos de la investigación

1.3.1 Objetivo general

Determinar la correlación estadística entre las mediciones de color obtenidas mediante visión por computadora y colorimetría tradicional, y su relación con la percepción sensorial del consumidor evaluada mediante pruebas sensoriales en productos horneados de panificación.

1.3.2 Objetivos específicos

Determinar las diferencias entre los valores de color (L, a, b* y ΔE) obtenidos mediante visión por computadora y los obtenidos con colorimetría tradicional en productos horneados.

Determinar la relación entre las mediciones de color obtenidas por visión por computadora y colorimetría tradicional con la percepción sensorial del color en productos de panificación mediante pruebas de evaluación sensorial y análisis de color.

Determinar la influencia de las condiciones de horneado (tiempo y temperatura) en la variación del color obtenidos mediante visión por computadora y colorimetría tradicional.

1.4. Justificación de la investigación

1.4.1. Justificación teórica

El color constituye uno de los atributos sensoriales más importantes en la evaluación de la calidad de los productos horneados, ya que influye directamente en la percepción del consumidor y en la aceptación del producto. En la industria de panificación, el color de la corteza es un indicador del grado de horneado y del desarrollo de procesos como la reacción de Maillard y la caramelización, los cuales determinan la apariencia y parte de las características organolépticas del alimento. Aunque la colorimetría tradicional ha sido ampliamente utilizada para medir este atributo, existen limitaciones cuando se evalúan superficies heterogéneas o con distribución irregular del color. En este contexto, la presente investigación aporta evidencia sobre la relación entre la visión por computadora y la colorimetría tradicional, contribuyendo al conocimiento científico sobre métodos objetivos para la evaluación cromática de productos de panificación y su correspondencia con la percepción visual del consumidor.

1.4.2. Justificación metodológica

Desde el punto de vista metodológico, el estudio propone un procedimiento estandarizado para la evaluación del color mediante visión por computadora, basado en la captura y procesamiento digital de imágenes en el espacio de color CIELAB y su comparación con mediciones obtenidas mediante colorímetro. Asimismo, incorpora el análisis de la percepción del consumidor y la evaluación del efecto de diferentes condiciones de horneado sobre la variación cromática de diversos tipos de pan. Esta integración metodológica proporciona una estrategia objetiva y

reproducibile que puede ser aplicada y adaptada en futuras investigaciones relacionadas con el control de calidad alimentario.

1.4.3. Justificación práctica

La investigación tiene una aplicación directa en la industria panificadora, al demostrar que la visión por computadora puede emplearse como una herramienta eficiente para el control de calidad del color en productos horneados. Los resultados obtenidos permiten optimizar las condiciones de horneado, mejorar la uniformidad visual entre lotes y reducir la dependencia de evaluaciones subjetivas. Además, la utilización de sistemas basados en imágenes digitales representa una alternativa de menor costo operativo y con potencial para automatizar procesos de inspección y monitoreo de la calidad.

1.4.4. Justificación social y económica

Desde una perspectiva social y económica, la implementación de tecnologías de visión por computadora favorece la producción de alimentos con una apariencia más uniforme y acorde con las expectativas del consumidor, incrementando su aceptación y satisfacción. Asimismo, la mejora en los procesos de control de calidad contribuye a fortalecer la competitividad de las empresas panificadoras, reducir pérdidas derivadas de productos fuera de especificación y promover la adopción de tecnologías innovadoras que impulsen la modernización y sostenibilidad del sector alimentario.

1.5. Delimitaciones del estudio

1.5.1. Delimitación Temática

Este estudio se enfocará en la validación sensorial de técnicas de medición de color en productos horneados de panificación, comparando la precisión y representatividad de la visión por computadora con la colorimetría tradicional. Se analizará la correspondencia entre los valores obtenidos por ambas técnicas y su relación con la percepción sensorial del consumidor, con el fin de establecer metodologías más precisas para la evaluación del color en la industria de la panificación.

1.5.2. Delimitación Espacial

La investigación se llevará a cabo en los laboratorios de la Escuela de Ingeniería en Industrias Alimentarias de la Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión, donde se realizarán las mediciones instrumentales con visión por computadora y colorimetría tradicional. Asimismo, las pruebas sensoriales se desarrollarán en salas de evaluación sensorial controladas, garantizando condiciones óptimas de iluminación y temperatura para la percepción del color en productos horneados.

1.5.3. Delimitación Temporal

El estudio tendrá una duración estimada de cinco meses, durante los cuales se llevarán a cabo la selección de muestras, el desarrollo de la metodología experimental, la recolección de datos instrumentales y sensoriales, el análisis estadístico de resultados y la redacción de conclusiones.

1.5.4. Delimitación Metodológica

- Se trabajará con productos horneados de panificación seleccionados, asegurando que las muestras presenten variabilidad en la coloración debido a diferencias en tiempo y temperatura de horneado.

- La visión por computadora se implementará mediante un sistema de captura de imágenes calibrado con iluminación controlada, mientras que la colorimetría tradicional se realizará con un colorímetro triestímulo.
- Para la validación sensorial, se utilizarán paneles de evaluación entrenados y consumidores no entrenados, a fin de medir la percepción visual del color en los productos analizados.
- Se emplearán métodos estadísticos para determinar la correlación entre las mediciones instrumentales y la percepción sensorial, validando la confiabilidad y reproducibilidad de cada técnica.

1.5.5. Delimitación Conceptual

El estudio se centrará en los siguientes conceptos clave:

- Colorimetría tradicional: Evaluación del color mediante dispositivos que miden parámetros de color triestímulo en puntos específicos.
- Visión por computadora: Análisis del color a partir de imágenes digitales procesadas mediante software especializado.
- *Parámetros de color* (L , a , b^* y ΔE): Variables utilizadas para cuantificar el color en los alimentos.
- Percepción sensorial del color: Interpretación visual del color por parte de los consumidores, influenciada por factores psicológicos y ambientales.
- Condiciones de horneado: Variaciones en tiempo y temperatura que afectan el desarrollo del color en productos de panificación.

Este estudio quedará excluido de otros aspectos como la evaluación de la textura, el sabor o la composición química de los productos analizados, así como del uso de otras tecnologías de medición de color diferentes a las mencionadas.

CAPITULO II. MARCO TEORICO

2.1 Antecedentes de la investigación

En los últimos años, diversas investigaciones han abordado el uso de la colorimetría y la visión por computadora en la evaluación del color en productos alimentarios, con el objetivo de mejorar la precisión y representatividad de las mediciones en comparación con los métodos tradicionales.

2.1.1 Investigaciones internacionales

A continuación, se presentan algunos antecedentes relevantes a nivel internacional:

Watkins et al. (2024) publicaron un estudio titulado “*Machine Vision Requires Fewer Repeat Measurements than Colorimeters for Precise Seafood Colour Measurement*”, en el cual investigaron la precisión y reproducibilidad de la visión por computadora en la medición del color de productos alimentarios en comparación con colorímetros tradicionales. Su objetivo fue determinar cuántas mediciones repetidas son necesarias para obtener una evaluación precisa del color en tres especies de mariscos (salmón, rockling y camarón) tanto en estado crudo como cocido. Compararon tres métodos: visión por computadora, Nix Pro y Minolta CR400 colorímetro. Los resultados indicaron que la visión por computadora requería menos mediciones repetidas para alcanzar la misma precisión que los otros dispositivos, con una menor variabilidad residual. En promedio, la visión por computadora necesitó solo cuatro mediciones, mientras que los colorímetros tradicionales requirieron entre nueve y trece mediciones. Además, la visión por computadora mostró una mejor capacidad para capturar la variabilidad de color en superficies heterogéneas, lo que podría ser un factor relevante para su aplicación en productos horneados de panificación con estructuras irregulares (Watkins et al., 2024).

Tomasevic et al. (2019) llevaron a cabo un estudio titulado “*Comparison of a computer vision system vs. traditional colorimeter for color evaluation of meat products with various physical properties*”. En esta investigación, analizaron la capacidad de la visión por computadora para medir el color de productos cárnicos en comparación con un colorímetro triestímulo tradicional. Su objetivo fue evaluar la precisión y reproducibilidad de ambas técnicas en la medición de atributos de color (L^* , a^* , b^* y ΔE) en carne procesada con diferentes propiedades físicas. Los resultados demostraron que la visión por computadora proporcionaba mediciones más representativas y consistentes en productos con superficies irregulares, mientras que el colorímetro tradicional presentaba limitaciones debido a su medición puntual y su incapacidad para analizar variaciones de color en grandes áreas. Estos hallazgos sugieren que la visión por computadora podría ser una alternativa confiable para la evaluación del color en productos horneados de panificación, donde las superficies heterogéneas pueden afectar las mediciones tradicionales (Tomasevic et al., 2019).

Goñi y Salvadori (2017) publicaron un estudio titulado “*Color measurement: comparison of colorimeter vs. computer vision system*”, en el cual compararon dos técnicas de medición del color en alimentos: colorimetría triestímulo tradicional e imagen digital procesada mediante visión por computadora. Para ello, desarrollaron un sistema de captura de imágenes con iluminación controlada y software especializado para analizar los valores de color en el espacio CIELAB (L^* , a^* , b^*). Evaluaron 40 muestras de diferentes alimentos procesados y crudos, encontrando que la visión por computadora proporcionaba resultados más representativos y similares a la percepción humana del color. Aunque ambas técnicas mostraron correlación, la diferencia de color total (ΔE) fue significativa en algunas muestras, lo que indica que

la visión por computadora podría capturar variaciones sutiles que los colorímetros no detectan. Este estudio refuerza la idea de que la visión por computadora puede ser una herramienta más efectiva para evaluar el color de productos con texturas y tonalidades variables, como los productos horneados de panificación (Goñi & Salvadori, 2017).

Ünal et al. (2019) realizaron un estudio titulado “*Color assessment by different techniques of gilthead seabream (Sparus aurata) during cold storage*”, en el que analizaron la frescura de la dorada (*Sparus aurata*) mediante técnicas tradicionales de medición del color (colorimetría Minolta) y visión por computadora. El objetivo del estudio fue comparar ambas técnicas para determinar su eficacia en la evaluación del color durante el almacenamiento en frío. Los resultados indicaron que la visión por computadora ofrecía una evaluación más precisa y representativa de los cambios de color en la piel, las branquias y los ojos del pescado, en comparación con la colorimetría tradicional. Además, el análisis de imágenes permitía detectar variaciones de color imperceptibles a simple vista, lo que sugiere que esta tecnología podría aplicarse con éxito en la evaluación del color de productos de panificación, donde la percepción visual del consumidor es un factor clave en la aceptación del producto (Ünal et al., 2019).

2.1.2 Investigaciones nacionales

Urquiza (2017) realizó una investigación titulada “*Evaluación de las características físicas y sensoriales del pan tipo molde con sustitución parcial de harina de trigo por papa nativa (Solanum tuberosum) precocida*” en la Universidad Nacional José María Arguedas. El objetivo del estudio fue evaluar el impacto de la sustitución

parcial de harina de trigo por papa nativa precocida en las características físicas y sensoriales del pan tipo molde. Se empleó un diseño experimental con diferentes porcentajes de sustitución y se analizaron variables como humedad, volumen, color y textura, además de la percepción sensorial del consumidor mediante pruebas de degustación. Los resultados indicaron que la adición de papa nativa influye en la estructura del pan, modificando su color y textura, y que niveles moderados de sustitución son aceptables sensorialmente. La investigación concluyó que la incorporación de papa nativa precocida es viable para mejorar el valor nutricional del pan sin afectar negativamente sus propiedades organolépticas (Urquiza, 2017).

Quiroz (2021) publicó un estudio titulado *“Aplicación de técnicas de visión por computadora en la selección de palta Hass de calidad”* en la Universidad Señor de Sipán. La investigación tuvo como objetivo implementar un sistema de visión por computadora para evaluar y clasificar paltas Hass según su calidad, considerando atributos como color, tamaño y defectos superficiales. Se diseñó un sistema basado en algoritmos de procesamiento de imágenes y aprendizaje automático para analizar digitalmente las frutas y compararlas con estándares de calidad. Los resultados mostraron que la visión por computadora permitió una clasificación precisa y rápida, superando la eficiencia de métodos tradicionales de inspección visual. Se concluyó que esta tecnología puede optimizar los procesos de selección de frutas en la industria agrícola, reduciendo la variabilidad y mejorando la consistencia en la evaluación de la calidad del producto (Quiroz, 2021).

Valqui, Tafur y Huayama (2024) publicaron un artículo titulado *“Evaluación de las características físicoquímicas y sensoriales del pan de molde enriquecido con kiwicha (*Amaranthus caudatus* L.) y cañihua (*Chenopodium pallidicaule* Aellen)”*.

El objetivo del estudio fue analizar el efecto de la incorporación de harinas de kiwicha y cañihua en las propiedades fisicoquímicas y sensoriales del pan de molde. Se evaluaron parámetros como humedad, actividad de agua, textura y color, además de realizar pruebas sensoriales con un panel de consumidores. Los resultados indicaron que la adición de estos granos andinos mejoró el perfil nutricional del pan y tuvo un impacto significativo en su color y textura, aumentando su aceptabilidad en comparación con el pan convencional. Se concluyó que el uso de kiwicha y cañihua en la panificación es una alternativa viable para desarrollar productos con mayor valor nutricional y buena aceptación sensorial (Valqui et al., 2024).

García y Mechán (2022) realizaron el estudio titulado *Optimización de las características texturales y sensoriales del pan de molde a base de harina de Prosopis pallida, Amaranthus caudatus y almidón de papa*, con el objetivo de mejorar la calidad de pan de molde utilizando harinas alternativas. Se evaluaron la textura, color y aceptación sensorial del pan elaborado con diferentes proporciones de estos ingredientes. Los resultados indicaron que la combinación de harina de algarrobo y cañihua permitió mejorar la textura y la humedad del pan sin afectar su aceptación por parte de los consumidores. Además, el uso de harinas alternativas aumentó el contenido de proteínas y fibra del pan, lo que resalta su potencial como alimento funcional. Este estudio confirma la importancia de explorar nuevos ingredientes en la panificación para mejorar la calidad nutricional y sensorial de los productos horneados (García & Mechán, 2022).

2.2 Bases teóricas

La evaluación del color en productos alimentarios es un componente esencial en el control de calidad y la percepción del consumidor. En el caso de los productos horneados, la coloración es un indicador crítico del estado de cocción, la composición de los ingredientes y la presencia de reacciones químicas como la reacción de Maillard y la caramelización. La colorimetría y la visión por computadora son las principales herramientas utilizadas para la cuantificación del color, cada una con sus ventajas y limitaciones. La investigación en esta área ha permitido mejorar la precisión de las mediciones, optimizar los parámetros de horneado y establecer correlaciones con la percepción sensorial del consumidor.

2.2.1 Importancia del Color en Productos Alimentarios

El color es un atributo sensorial clave en la evaluación de los alimentos y tiene un impacto significativo en la percepción de calidad y aceptación del consumidor. Diferentes estudios han confirmado que los consumidores asocian ciertos colores con frescura, calidad y sabor, influyendo en sus decisiones de compra (Pathare et al., 2013; Tomasevic et al., 2019). En productos horneados, los tonos dorados y marrones se consideran indicadores de cocción óptima, mientras que colores demasiado oscuros pueden sugerir sobrecoCCIÓN o quemado, y colores pálidos pueden indicar un horneado insuficiente.

La percepción del color también se asocia con las propiedades nutricionales y la presencia de antioxidantes en los productos alimentarios. Por ejemplo, el uso de harinas alternativas como la kiwicha o la cañihua en panificación ha demostrado afectar la tonalidad del producto final, lo que puede influir en la aceptación del consumidor (Valqui et al., 2024). La adecuada evaluación del color permite a los

fabricantes mantener la consistencia del producto y mejorar su posicionamiento en el mercado.

2.2.2 Métodos de Evaluación del Color en Productos Horneados

La evaluación del color en productos horneados puede realizarse mediante métodos tradicionales de colorimetría y técnicas avanzadas de visión por computadora.

2.2.2.1 Colorimetría Tradicional

La colorimetría tradicional se basa en el uso de colorímetros triestímulo y espectrofotómetros, que miden la luz reflejada en el espacio de color CIELAB. Este sistema cuantifica el color en tres parámetros:

- L^* (luminosidad)
- a^* (rojo-verde)
- b^* (azul-amarillo)

Estos dispositivos permiten obtener datos objetivos y repetibles sobre el color de los productos alimentarios, pero presentan limitaciones cuando se aplican a superficies heterogéneas, como las de los productos horneados (Hunter & Harold, 1987).

2.2.2.2 Visión por Computadora

La visión por computadora ha emergido como una herramienta más avanzada para la medición del color en la industria alimentaria. Esta tecnología utiliza cámaras digitales de alta resolución y algoritmos de procesamiento de imágenes para analizar el color en toda la superficie del producto. Las principales ventajas de la visión por computadora incluyen:

- Evaluación del color en áreas extensas en lugar de puntos específicos.

- Mayor reproducibilidad en comparación con los colorímetros tradicionales.
- Capacidad para analizar productos con variabilidad de tonalidades.

Estudios recientes han demostrado que la visión por computadora es más eficiente que los colorímetros tradicionales en la evaluación del color de productos con superficies no homogéneas, como panes y galletas.

2.2.3 Factores que afectan el desarrollo del color en productos horneados

El color de los productos horneados es el resultado de la interacción de varios factores, incluyendo las reacciones químicas y las condiciones de horneado.

2.2.3.1 Reacción de Maillard y Caramelización

La reacción de Maillard es un proceso químico fundamental en la panificación. Se produce cuando los azúcares reductores reaccionan con aminoácidos a temperaturas elevadas, generando compuestos pigmentados llamados melanoidinas, que afectan el color y el sabor del producto final (Pedreschi et al., 2005). Paralelamente, la caramelización ocurre cuando los azúcares se descomponen térmicamente sin la presencia de proteínas, formando tonalidades ámbar y marrón.

2.2.3.2 Influencia de las Condiciones de Horneado

El tiempo y la temperatura de horneado influyen directamente en el desarrollo del color en productos de panificación. A temperaturas más altas y tiempos prolongados, las reacciones de pardeamiento son más intensas, generando tonos más oscuros. Sin embargo, una exposición excesiva al calor puede provocar la formación de compuestos no deseados como la acrilamida, un potencial carcinógeno (Pathare et al., 2013).

2.2.4 Aplicaciones de la Visión por Computadora en la Industria Alimentaria

La visión por computadora ha encontrado aplicaciones en diversos procesos dentro de la industria alimentaria, tales como:

- **Inspección de calidad en frutas y vegetales:** Permite la clasificación automática según color, madurez y presencia de defectos superficiales (Quiroz, 2021).
- **Control de calidad en productos cárnicos:** Se usa para evaluar la frescura y calidad del color en carnes.
- **Determinación del color en panificación:** Permite la evaluación de la uniformidad del horneado y la identificación de defectos visuales en la corteza y la miga.

2.3 Definición de términos básicos

- **Caramelización:** La caramelización es un proceso de degradación térmica de los azúcares que ocurre a altas temperaturas, resultando en la formación de compuestos de color marrón y sabores característicos. Este proceso contribuye al color y sabor de productos horneados como el pan y los pasteles (Kroh, 1994). Proceso mediante el cual los azúcares se descomponen y transforman debido a la aplicación de calor, generando compuestos de color marrón y sabores característicos (ASALE & RAE, 2014a).
- **Color en alimentos:** El color en los alimentos es una propiedad sensorial crítica que influye en la percepción de calidad y aceptabilidad por parte del consumidor. En

productos horneados, el color está relacionado con procesos como la reacción de Maillard y la caramelización, que ocurren durante el horneado (Pathare et al., 2013).

- **Colorimetría:** La colorimetría es un método de análisis químico basado en la cuantificación de la intensidad del color en soluciones para determinar la concentración de una sustancia específica (ASALE & RAE, 2014b). La colorimetría es una técnica utilizada para cuantificar y describir el color de un objeto mediante valores numéricos. Esta medición se realiza a través de instrumentos como colorímetros o espectrofotómetros, que permiten obtener coordenadas de color en espacios como CIELAB o CIELCh (Hunter & Harold, 1987). Esta técnica es ampliamente utilizada en la industria alimentaria para evaluar la calidad y consistencia del color en productos horneados.
- **Colorímetro:** dispositivo empleado en colorimetría para medir y analizar las características cromáticas de una muestra, comparándola con estándares de referencia (ASALE & RAE, 2014c).
- **Espacio de color CIELAB:** El espacio de color CIELAB es un modelo tridimensional utilizado para describir colores de manera objetiva. Este sistema define el color en términos de tres coordenadas: L* (luminosidad), a* (eje rojo-verde) y b* (eje amarillo-azul). Es ampliamente utilizado en la industria alimentaria debido a su capacidad para correlacionarse con la percepción humana del color (CIE, 2004).
- **Espectrofotómetro:** dispositivo empleado en espectrofotometría para realizar mediciones precisas de la absorción o transmisión de luz a diferentes longitudes de onda (ASALE & RAE, 2014d).
- **Reacción de Maillard:** La reacción de Maillard es un proceso químico no enzimático que ocurre entre aminoácidos y azúcares reductores durante el

calentamiento. Esta reacción es responsable del desarrollo del color marrón y de los sabores característicos en productos horneados (Martins et al., 2001).

- **Visión por computadora:** La visión por computadora es un campo de la inteligencia artificial que permite a las máquinas interpretar y analizar imágenes digitales. En el contexto de la medición del color en alimentos, esta tecnología utiliza algoritmos para procesar imágenes y extraer datos de color, textura y forma, lo que permite una evaluación objetiva y automatizada (Gonzalez & Woods, 2018).

2.4 Hipótesis de investigación

2.4.1 Hipótesis general

Existe una correlación significativa entre las mediciones instrumentales de color obtenidas mediante visión por computadora y colorimetría tradicional con la percepción sensorial del consumidor en productos horneados de panificación.

2.4.2 Hipótesis específicas

Existen diferencias significativas entre los valores de color (L^* , a^* , b^* y ΔE) obtenidos mediante visión por computadora y los obtenidos con colorimetría tradicional en productos horneados.

Existe una relación significativa entre las mediciones de color obtenidas por visión por computadora y colorimetría tradicional con la percepción sensorial del color en productos de panificación.

Las condiciones de horneado (tiempo y temperatura) influyen significativamente en la variación del color medido con visión por computadora y colorimetría tradicional.

2.5 Operacionalización de las variables

Dado que el presente estudio tiene un enfoque correlacional, se analizará la relación entre las mediciones instrumentales del color obtenidas mediante visión por computadora y colorimetría tradicional, en comparación con la percepción sensorial del color en productos horneados de panificación.

Tabla 1

Operacionalización de variables

Variable	Dimensión	Indicador	Instrumento de medición
Medición instrumental del color	Evaluación de color mediante colorimetría tradicional y visión por computadora	Valores L^* , a^* , b^* y ΔE obtenidos en CIELAB	Colorímetro, software de visión por computadora
Percepción sensorial del color	Evaluación visual por panel de consumidores	Preferencia del color, diferencia percibida entre muestras.	Prueba sensorial tipo test de comparación de color

Descripción de las variables

A. Medición instrumental del color

Se refiere a los valores cuantificables obtenidos con **colorímetros tradicionales** y **visión por computadora**. Se analizarán los componentes del espacio de color *CIELAB* (L^* , a^* , b^*) y la diferencia de color ΔE , que permite medir la variación perceptual entre colores. La medición se realizará en **productos horneados de panificación** bajo condiciones controladas.

B. Percepción sensorial del color

Se evaluará la apreciación visual de los consumidores sobre el color de los productos horneados. Se realizarán pruebas sensoriales con un panel de 71 consumidores, utilizando una comparación visual directa entre muestras. Se busca establecer el grado de correlación entre las mediciones instrumentales y la percepción visual.

CAPITULO III. METODOLOGÍA

3.1 Diseño metodológico

3.1.1 Tipo de Investigación

La presente investigación es de tipo aplicada, debido a que busca proponer el uso de la visión por computadora como una herramienta alternativa para la medición del color en productos de panificación, contribuyendo al mejoramiento de los procesos de control de calidad en la industria alimentaria. El estudio se orienta a la solución de un problema práctico, relacionado con la evaluación objetiva del color en la corteza y miga de productos horneados mediante la comparación entre colorimetría tradicional y visión computacional.

Asimismo, la investigación adopta un enfoque cuantitativo, ya que se basa en la medición objetiva del color mediante instrumentos y técnicas de procesamiento de imágenes, obteniendo valores numéricos en el espacio cromático CIELAB (L^* , a^* , b^*), los cuales fueron analizados mediante métodos estadísticos. El enfoque cuantitativo permitió evaluar la relación entre ambos métodos de medición del color y determinar su nivel de concordancia en productos de panificación.

El estudio también presenta un carácter experimental, debido a que se manipularon condiciones de análisis cromático en el tercer experimento mediante la aplicación de diferentes tratamientos de horneado (tiempo y temperatura), con el fin de evaluar la variación del color en pan francés, pan Ciabatta y pan árabe, comparando los resultados obtenidos mediante colorímetro y visión por computadora.

3.1.2 Nivel de la Investigación

El nivel de la investigación es comparativo, correlacional y explicativo. Es comparativo porque analiza las diferencias entre los valores cromáticos obtenidos mediante colorimetría tradicional y visión por computadora en la corteza y miga de productos de panificación, evaluando cuál método representa mejor el color real del producto. Es correlacional porque determina el grado de relación entre ambos métodos de medición del color mediante el análisis estadístico de correlación de Pearson, permitiendo identificar la concordancia entre los valores cromáticos obtenidos en el espacio CIELAB.

El estudio presenta un nivel explicativo en el tercer experimento, debido a que analiza la influencia de las condiciones de horneado (tiempo y temperatura) en la variación del color de los panes, evaluando cómo estos factores afectan los valores cromáticos medidos mediante visión por computadora y colorimetría tradicional. Este estudio se clasifica como una investigación explicativa y correlacional. Es explicativa porque busca comprender la relación entre los valores de color obtenidos con diferentes técnicas de medición y la percepción visual de los consumidores. Asimismo, es correlacional porque pretende determinar el grado de asociación entre estas variables sin realizar modificaciones experimentales en los sujetos de estudio.

3.1.3 Diseño de la Investigación

El diseño de la investigación fue experimental, comparativo y transversal, estructurado en tres experimentos independientes orientados a evaluar la concordancia entre la colorimetría tradicional y la visión por computadora en la medición del color de productos de panificación, así como determinar la influencia de las condiciones de horneado en la variación cromática de los panes. Se considera experimental porque en el tercer experimento se manipularon las condiciones de

horneado, específicamente la temperatura y el tiempo, con el fin de evaluar su efecto en la variación del color de la corteza de los panes. Es comparativo porque en los tres experimentos se contrastaron dos métodos de medición del color, el colorímetro y la visión por computadora, mediante el análisis de los parámetros cromáticos L^* , a^* y b^* del espacio CIELAB. Asimismo, es transversal porque las mediciones se realizaron en un único momento para cada muestra sin seguimiento en el tiempo.

La investigación se estructuró en tres experimentos claramente definidos: evaluación del color de la corteza de productos de panificación, evaluación del color de la miga de productos de panificación y evaluación de la influencia de las condiciones de horneado en el color de diferentes tipos de pan. La estructura experimental de cada experimento se presenta en las Tablas 2, 3 y 4.

Tabla 2

Diseño experimental del Experimento 1: Evaluación del color en la corteza

Código de muestra	Tipo de producto	Colorímetro	Visión computacional	Elección de consumidores
PAN1	Pan de molde	Sí	Sí	Sí
PAN2	Pan integral	Sí	Sí	Sí
PAN3	Pan francés	Sí	Sí	Sí
PAN4	Bizcocho	Sí	Sí	Sí
PAN5	Pan de quinua	Sí	Sí	Sí
PAN6	Pan de soya	Sí	Sí	Sí
PAN7	Pan de yema	Sí	Sí	Sí
PAN8	Galleta dulce con chispas de chocolate	Sí	Sí	Sí
PAN9	Pan con semillas de linaza	Sí	Sí	Sí
PAN10	Pan de maíz	Sí	Sí	Sí

Nota. Se evaluó el color de la corteza mediante colorimetría tradicional y visión por computadora, con posterior elección de consumidores para determinar la representatividad del color observado.

En el primer experimento, se evaluó el color de la corteza de diez productos de panificación mediante colorimetría tradicional y visión por computadora, obteniendo los valores cromáticos L^* , a^* y b^* del espacio CIELAB. Posteriormente, se realizó una evaluación de consumidores con el fin de determinar cuál método representaba mejor el color real del producto, permitiendo contrastar la medición instrumental con la percepción visual.

Tabla 3

Diseño experimental del Experimento 2: Evaluación del color en la miga

Código de muestra	Tipo de producto	Colorímetro	Visión computacional	Elección de consumidores
PAN1	Pan de molde	Sí	Sí	Sí
PAN2	Pan integral	Sí	Sí	Sí
PAN3	Pan francés	Sí	Sí	Sí
PAN4	Bizcocho	Sí	Sí	Sí
PAN5	Pan de quinua	Sí	Sí	Sí
PAN6	Pan de soya	Sí	Sí	Sí
PAN7	Pan de yema	Sí	Sí	Sí
PAN9	Pan con semillas de linaza	Sí	Sí	Sí
PAN10	Pan de maíz	Sí	Sí	Sí

Nota. La muestra PAN8 fue excluida por no presentar estructura de miga.

En el segundo experimento, se evaluó el color de la miga de los productos de panificación utilizando los mismos métodos de medición cromática. La muestra PAN8 fue excluida debido a que corresponde a una galleta y no presenta estructura de miga comparable con los panes evaluados. Se obtuvieron los valores cromáticos L^* , a^* y b^* mediante colorímetro y visión por computadora, realizándose

posteriormente la evaluación de consumidores para determinar la representatividad cromática de ambos métodos.

Tabla 5

Diseño experimental del Experimento 3: Tratamientos de horneado

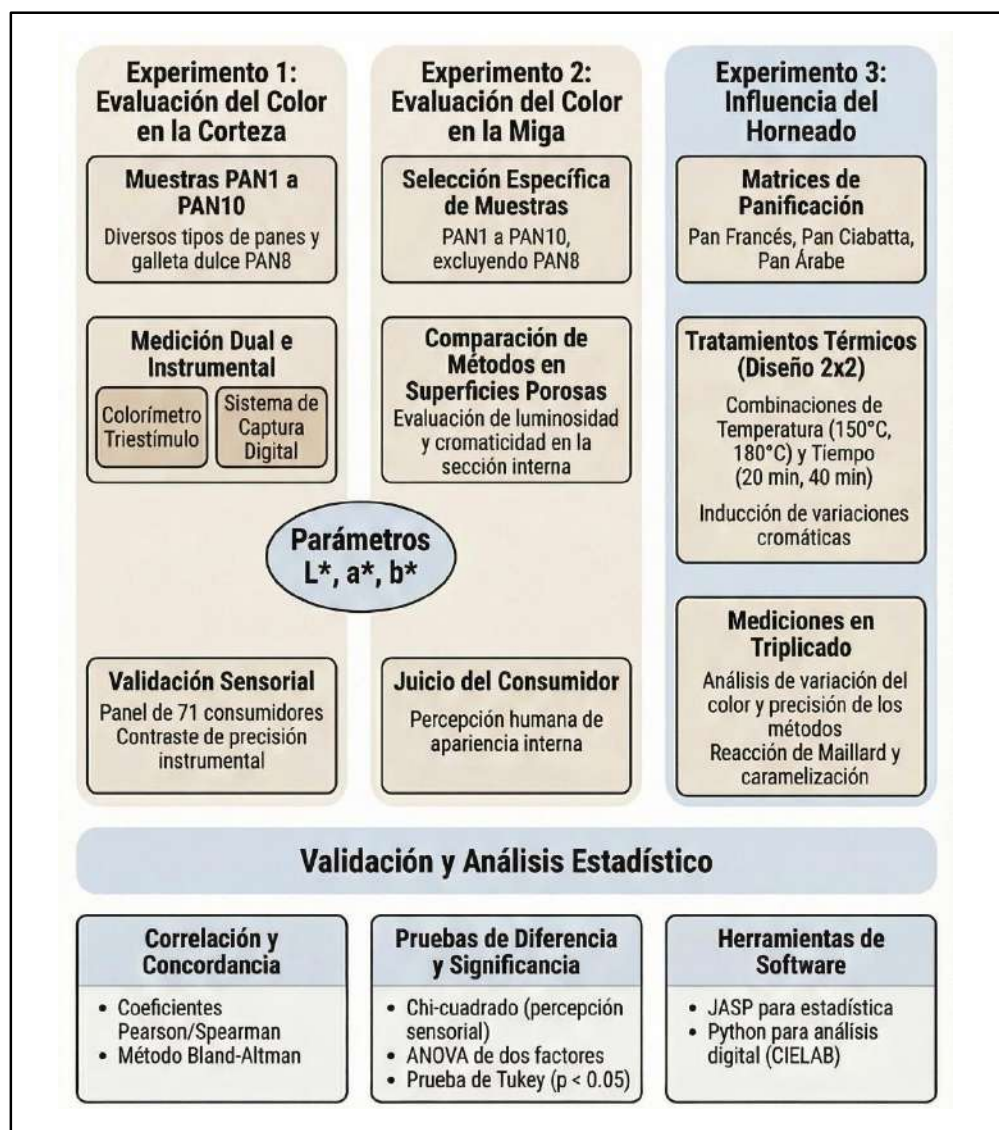
Tipo de pan	T1	T2	T3	T4	Métodos de medición	Rep.
Francés	150°C 20 min	150°C 40 min	180°C 20 min	180°C 40 min	Colorímetro y Visión computacional	3
Ciabatta	150°C 20 min	150°C 40 min	180°C 20 min	180°C 40 min	Colorímetro y Visión computacional	3
Árabe	150°C 20 min	150°C 40 min	180°C 20 min	180°C 40 min	Colorímetro y Visión computacional	3

Nota. Se evaluó la influencia del tiempo y la temperatura de horneado en la variación del color de la corteza sin evaluación de consumidores, Rep. = Repeticiones.

En el tercer experimento, se evaluó la influencia de las condiciones de horneado en el color de tres tipos de pan: pan francés, pan Ciabatta y pan árabe. Cada tipo de pan fue sometido a cuatro tratamientos de horneado correspondientes a combinaciones de temperatura y tiempo (150 °C durante 20 minutos, 150 °C durante 40 minutos, 180 °C durante 20 minutos y 180 °C durante 40 minutos). Las mediciones cromáticas se realizaron en triplicado mediante colorímetro y visión por computadora, obteniendo los valores L*, a* y b*, con el fin de analizar la variación del color en función de las condiciones de horneado y comparar la precisión de ambos métodos de medición.

Este diseño experimental permitió comparar la precisión de la visión por computadora frente a la colorimetría tradicional en la medición del color de la corteza y la miga de productos de panificación, validar la representatividad cromática mediante la percepción de consumidores y determinar la influencia del tiempo y la temperatura de horneado en la variación del color de los panes, asegurando la coherencia metodológica con los objetivos, resultados estadísticos y discusión de la investigación.

Figura 1.
Diagrama del diseño de la investigación.



3.1.4 Enfoque de la Investigación

El enfoque de la investigación es cuantitativo, debido a que se basa en la medición objetiva del color mediante instrumentos y técnicas de procesamiento digital de imágenes, obteniendo datos numéricos en el espacio cromático CIELAB (L^* , a^* , b^*), los cuales fueron analizados mediante métodos estadísticos.

Este enfoque permitió evaluar de manera objetiva la concordancia entre la colorimetría tradicional y la visión por computadora en la medición del color de la corteza y miga de productos de panificación, así como analizar la influencia de las condiciones de horneado en la variación cromática de los panes. La información obtenida fue procesada mediante técnicas de estadística descriptiva e inferencial, incluyendo correlación de Pearson, prueba chi-cuadrado, análisis de varianza (ANOVA) y prueba de Tukey, lo que permitió validar científicamente los resultados obtenidos.

Asimismo, el enfoque cuantitativo facilitó la comparación sistemática entre ambos métodos de medición del color y la evaluación de la percepción de los consumidores en los experimentos de corteza y miga, permitiendo establecer relaciones estadísticas entre las variables de estudio y generar conclusiones objetivas sobre la precisión y aplicabilidad de la visión por computadora en el análisis cromático de productos horneados.

3.2 Población y muestra

3.2.1 Población

La población de la investigación estuvo constituida por productos de panificación horneados que presentan características de corteza y miga susceptibles de evaluación cromática mediante colorimetría tradicional y visión por computadora, así como por

consumidores potenciales capaces de evaluar visualmente la representatividad del color en los productos analizados. Esta población incluye productos horneados elaborados a partir de harina de trigo y otros ingredientes utilizados en la industria panificadora, los cuales presentan variaciones de color generadas por los procesos de horneado, caramelización y reacción de Maillard, factores que influyen directamente en la apariencia del producto.

3.2.2 Muestra

La muestra de la investigación se estructuró de acuerdo con los tres experimentos desarrollados en el estudio. En el primer experimento, la muestra estuvo conformada por diez productos de panificación codificados como PAN1 a PAN10, los cuales fueron evaluados en la corteza mediante colorimetría tradicional y visión por computadora, realizándose posteriormente la elección de consumidores para determinar la representatividad cromática de los métodos de medición del color. En el segundo experimento, la muestra estuvo conformada por nueve productos de panificación (PAN1 a PAN10, excluyendo PAN8), los cuales fueron evaluados en la miga mediante colorimetría tradicional y visión por computadora. La muestra PAN8, correspondiente a una galleta dulce con chispas de chocolate, fue excluida debido a que no presenta estructura de miga comparable con los panes evaluados, lo que impedía el análisis cromático interno. Posteriormente, se realizó la evaluación de consumidores con el fin de determinar cuál método representaba mejor el color real de la miga de los productos. En el tercer experimento, la muestra estuvo conformada por tres tipos de pan elaborados bajo condiciones controladas de horneado: pan francés, pan Ciabatta y pan árabe. Cada tipo de pan fue sometido a cuatro tratamientos de horneado correspondientes a 150 °C durante 20 minutos, 150 °C durante 40 minutos, 180 °C durante 20 minutos y 180 °C durante 40 minutos. Para

cada tratamiento se realizaron mediciones cromáticas en triplicado mediante colorimetría tradicional y visión por computadora, con el propósito de evaluar la influencia del tiempo y la temperatura de horneado en la variación del color de la corteza de los panes y determinar la concordancia entre ambos métodos de medición.

3.3 Técnicas de recolección de datos

La recolección de datos se realizó mediante la técnica de medición instrumental del color y evaluación perceptual de consumidores, utilizando como instrumentos un colorímetro, un sistema de visión por computadora y una ficha de evaluación de preferencia visual. Estas técnicas permitieron obtener información objetiva y subjetiva del color de los productos de panificación evaluados, garantizando la confiabilidad y validez de los resultados.

En el primer experimento, se realizó la medición del color de la corteza de diez productos de panificación adquiridos en las panaderías de los supermercados Plaza Vea y Tottus en la Ciudad de Huacho codificados como PAN1 a PAN10. Las mediciones cromáticas se efectuaron mediante un colorímetro, obteniendo los parámetros L^* , a^* y b^* del espacio de color CIELAB. Posteriormente, se capturaron imágenes digitales de cada muestra bajo condiciones controladas de iluminación y fondo uniforme, las cuales fueron procesadas mediante un sistema de visión por computadora para obtener los mismos parámetros cromáticos. Finalmente, se realizó la evaluación de consumidores mediante una ficha de elección visual, en la cual los participantes seleccionaron el método que representaba mejor el color real del producto.

En el segundo experimento, se realizó la medición del color de la miga de los productos de panificación utilizando el mismo procedimiento instrumental. Se evaluaron las muestras PAN1 a PAN10, excluyendo la muestra PAN8 debido a que

corresponde a una galleta y no presenta estructura de miga. Las mediciones cromáticas se realizaron mediante colorímetro y visión por computadora, obteniendo los valores L^* , a^* y b^* , y posteriormente se aplicó la evaluación de consumidores para determinar la representatividad del color observado.

En el tercer experimento, se elaboraron tres tipos de pan (pan francés, pan Ciabatta y pan árabe) bajo condiciones controladas de horneado, aplicando cuatro tratamientos de temperatura y tiempo. Las muestras obtenidas fueron evaluadas mediante colorímetro y visión por computadora, realizando mediciones cromáticas en triplicado para obtener los parámetros L^* , a^* y b^* del espacio CIELAB. En este experimento no se realizó evaluación de consumidores, debido a que el objetivo fue determinar la influencia de las condiciones de horneado en la variación del color.

Las mediciones mediante colorímetro se realizaron directamente sobre la superficie de la corteza y la miga de los productos, registrando los valores cromáticos de manera repetida para asegurar la precisión de los datos. Por otro lado, la visión por computadora consistió en la captura de imágenes digitales de las muestras utilizando una cámara en condiciones de iluminación controlada, fondo uniforme y distancia fija, posteriormente procesadas mediante software de análisis de imágenes para obtener los valores cromáticos.

La evaluación de consumidores se realizó mediante una ficha de elección visual, en la cual los participantes observaron las imágenes de las muestras y seleccionaron el método de medición que representaba mejor el color real del producto. Esta técnica permitió contrastar la medición instrumental con la percepción humana del color.

De esta manera, la aplicación de estas técnicas permitió obtener información confiable sobre la medición del color mediante colorimetría tradicional y visión por computadora, así como evaluar la percepción visual de los consumidores y analizar la influencia de las condiciones de horneado en la variación cromática de los productos de panificación.

3.3.1 Procedimiento experimental

El procedimiento experimental se desarrolló en tres etapas correspondientes a los tres experimentos planteados en la investigación, siguiendo una secuencia ordenada de preparación de muestras, medición cromática mediante colorímetro, captura de imágenes para visión por computadora y evaluación de consumidores cuando correspondía. Todas las mediciones se realizaron bajo condiciones controladas de iluminación, fondo uniforme y temperatura ambiente para garantizar la confiabilidad de los resultados.

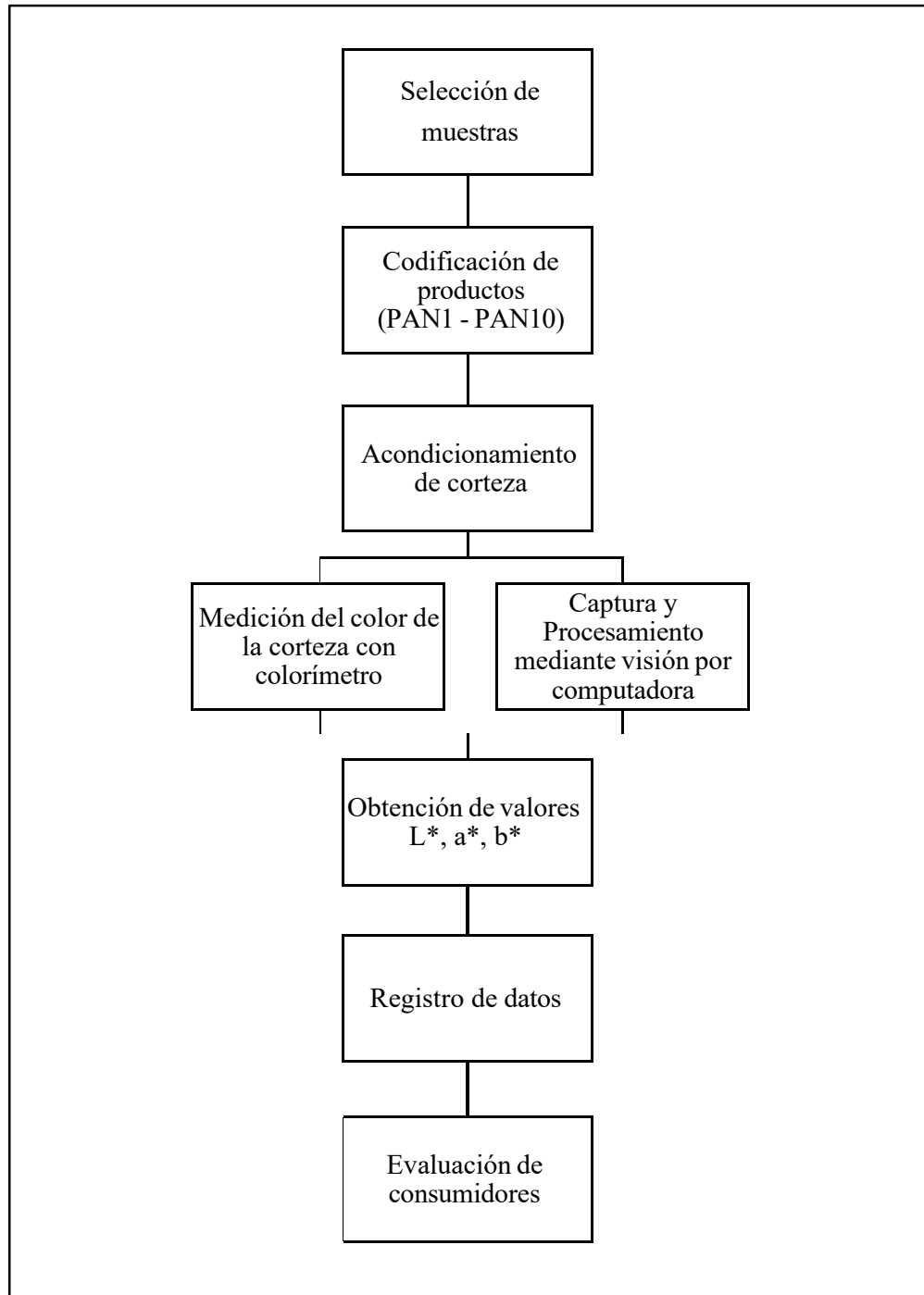
a) Comparación de color medido en corteza de productos horneados:

En el primer experimento, se seleccionaron diez productos de panificación codificados como PAN1 a PAN10. Cada muestra fue identificada, rotulada y acondicionada para la medición del color de la corteza. Posteriormente, se realizaron las mediciones cromáticas mediante colorímetro, obteniendo los valores L^* , a^* y b^* en diferentes puntos de la superficie del producto. Luego se capturaron imágenes digitales de cada muestra utilizando una cámara colocada a una distancia fija, con iluminación uniforme y fondo blanco, con el fin de procesarlas mediante visión por computadora y obtener los parámetros cromáticos correspondientes. Finalmente, se realizó la evaluación de consumidores mediante una ficha de elección visual, en la

cual los participantes seleccionaron el método que representaba mejor el color real del producto.

Figura 2

Procedimiento del Experimento 1: Comparación de color medido en corteza de productos horneados

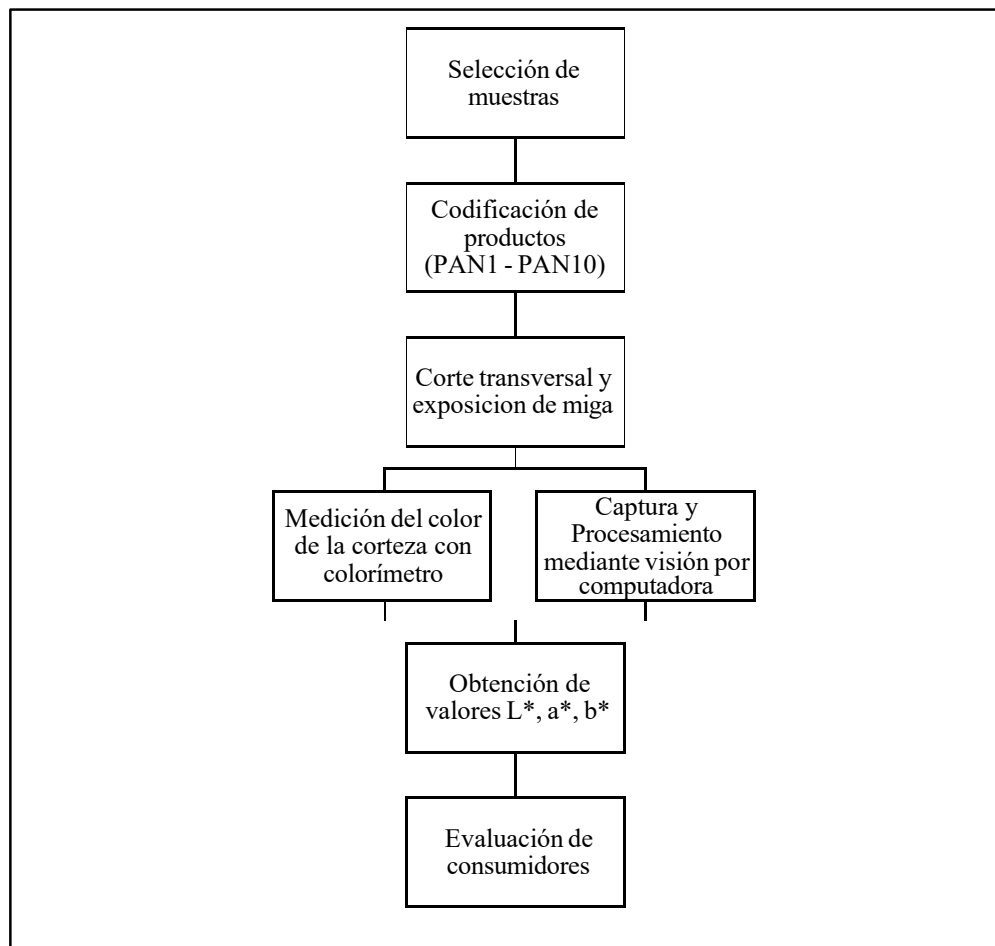


b) Comparación de color medido en miga de productos horneados:

En el segundo experimento, se realizó la evaluación del color de la miga de los productos de panificación. Para ello, las muestras PAN1 a PAN10 fueron cortadas de forma transversal para exponer la miga, excluyendo la muestra PAN8 debido a que corresponde a una galleta y no presenta estructura interna comparable con los panes. Posteriormente, se realizaron las mediciones cromáticas mediante colorímetro y visión por computadora, siguiendo el mismo procedimiento de captura de imágenes y procesamiento digital.

Figura 3

Procedimiento del Experimento2: Comparación de color medido en miga de productos horneados



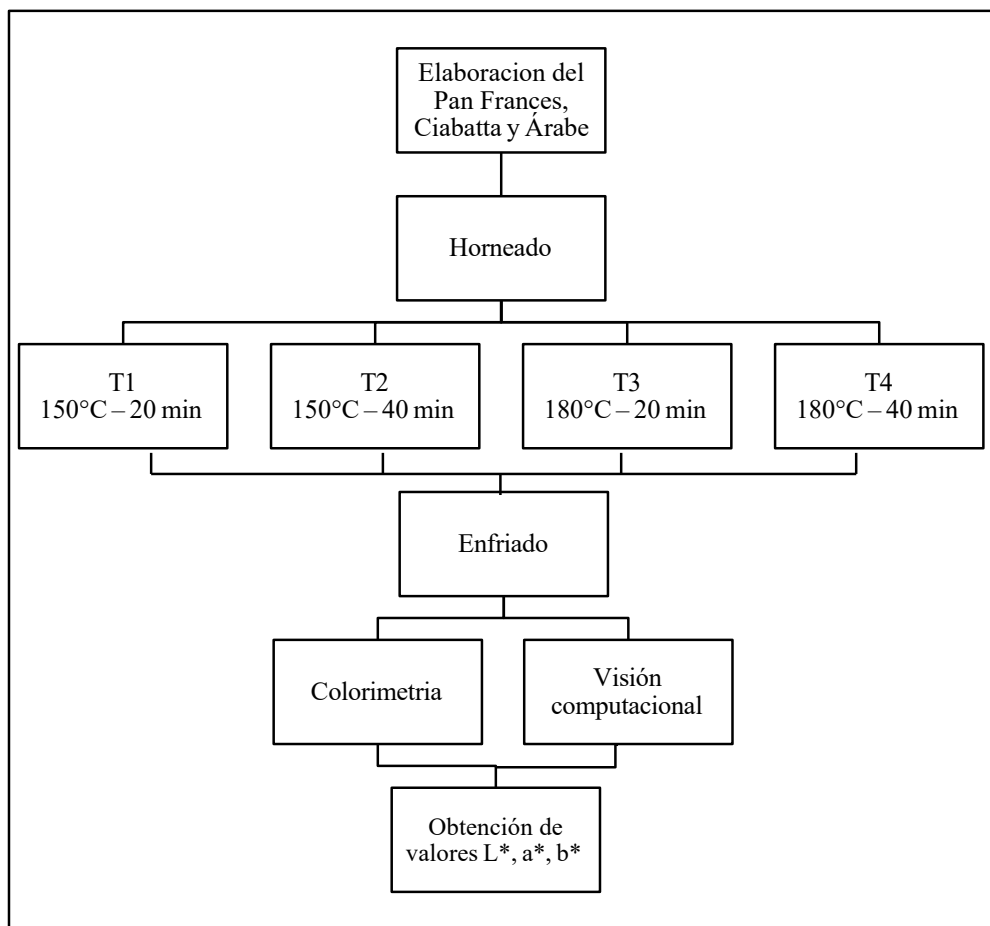
La validación sensorial fue realizada mediante la participación de 71 consumidores, quienes evaluaron visualmente los productos de panificación en función de su color, con el objetivo de determinar la preferencia del consumidor frente a las muestras analizadas mediante colorimetría y visión por computadora. Los participantes estuvieron conformados por hombres y mujeres con edades comprendidas entre 17 y 54 años, seleccionados bajo un muestreo no probabilístico por conveniencia, considerando su disponibilidad y disposición para participar en la evaluación. La prueba se aplicó mediante un formulario digital, en el cual los consumidores observaron las muestras de pan y seleccionaron el color que mejor representaba a la muestra. Los datos obtenidos fueron registrados y organizados en una base de datos para su posterior análisis estadístico mediante la prueba de chi-cuadrado, con el fin de determinar la relación entre la preferencia del consumidor y los valores cromáticos obtenidos por los métodos instrumentales.

c) Influencia del horneado en la medición del color en productos de panificación

En el tercer experimento, se elaboraron tres tipos de pan (pan francés, pan Ciabatta y pan árabe) bajo condiciones controladas de horneado. Cada tipo de pan fue sometido a cuatro tratamientos de temperatura y tiempo (150 °C durante 20 minutos, 150 °C durante 40 minutos, 180 °C durante 20 minutos y 180 °C durante 40 minutos). Luego del horneado, las muestras fueron enfriadas a temperatura ambiente y se realizaron las mediciones cromáticas de la corteza mediante colorímetro y visión por computadora en triplicado. En este experimento no se realizó evaluación de consumidores, debido a que el objetivo fue analizar la influencia de las condiciones de horneado en la variación del color.

Figura 4

Procedimiento del Experimento2: Comparación de color medido en corteza de productos horneados



Para el desarrollo del tercer experimento se elaboraron tres tipos de pan: pan francés, pan Ciabatta y pan árabe, siguiendo formulaciones estándar de panificación reportadas en la literatura científica y técnica, con el fin de garantizar la reproducibilidad del proceso y la validez de los resultados cromáticos obtenidos. Las formulaciones se basaron en proporciones tradicionales de harina de trigo, agua, levadura, sal y otros ingredientes característicos de cada tipo de pan, adaptadas a condiciones de laboratorio. La elaboración de los panes se realizó en el laboratorio de la Escuela de Ingeniería en Industrias Alimentarias de la UNJFSC bajo condiciones controladas de temperatura y humedad, utilizando harina de trigo, agua potable, levadura seca instantánea, sal y aceite vegetal cuando correspondía. Los

ingredientes fueron pesados utilizando una balanza digital y mezclados siguiendo el método directo de panificación, el cual consiste en la mezcla simultánea de todos los ingredientes, amasado, fermentación, formado, reposo y horneado.

- **Formulación del pan francés:**

La formulación empleada para la elaboración del pan francés considera 1000 g de harina de trigo como base (100%), con 600 g de agua (60%), 15 g de levadura seca (1,5%) y 20 g de sal (2%). Esta masa de hidratación media-baja se enmarca dentro de los rangos típicos para panes franceses tipo baguette, donde el 60% de agua favorece una manipulación adecuada, una corteza bien formada y una miga relativamente compacta pero con alveolos irregulares (Cauvain & Young, 2018; Cauvain, 2011). La sal al 2% mejora la cohesión de la red de gluten, la retención de gas y el sabor, sin inhibir de forma excesiva la actividad fermentativa de la levadura, mientras que el 1,5% de levadura seca proporciona una fermentación controlada, adecuada para métodos de fermentación rápida y para obtener un desarrollo volumétrico equilibrado en la cocción (Goesaert et al., 2005; Lagrain, 2011).

Tabla 6

Formulación del pan francés

Ingrediente	Porcentaje (%)	Cantidad (g)
Harina de trigo	100	1000
Agua	60	600
Levadura seca	1.5	15
Sal	2	20

Nota. Los porcentajes de los ingredientes están basados en el % de harina de trigo.

El proceso de elaboración consistió en la mezcla de los ingredientes, amasado durante 10 minutos, fermentación durante 60 minutos, formado de barras, reposo de 20

minutos y horneado según los tratamientos establecidos. Esta formulación permite desarrollar una corteza dorada y una miga aireada, características del pan francés (García & Mechán, 2022; Urquizo, 2017).

- **Formulación del pan Ciabatta**

La formulación empleada para la elaboración del pan ciabatta contemplo una masa de alta hidratación, con un 70% de agua respecto al peso de harina de trigo, lo que se enmarca dentro de los rangos descritos para panes rústicos de miga abierta, como el ciabatta, en los que el aumento de la relación agua-harina favorece una mayor movilidad de las proteínas del gluten y un volumen específico más elevado (Cauvain & Young, 2018; Cauvain, 2011).

La sal se incorpora en un 2% de la harina, valor reportado como estándar en panificación para panes de trigo, ya que contribuye al sabor, a la estabilización de la red de gluten y al control de la velocidad de fermentación (Goesaert et al., 2005; Cauvain & Young, 2018).

La levadura seca se utiliza en un 1,5%, porcentaje que se encuentra dentro de los rangos típicos para métodos de fermentación rápida y que permite desarrollar una porosidad adecuada sin exceder la acidificación ni la pérdida de volumen (Lagrain, 2011; Cauvain, 2011). Finalmente, el aceite de oliva se añade en un 2%, lo que ayuda a lubricar la red de gluten, mejorar la textura de la miga y reducir ligeramente la firmeza del pan, sin afectar de forma negativa el desarrollo de alveolos, según se indica en estudios sobre grasas en panificación (Delcour & Hoskeney, 2010; Cauvain & Young, 2018).

Tabla 7*Formulación del pan Ciabatta*

Ingrediente	Porcentaje (%)	Cantidad (g)
Harina de trigo	100	1000
Agua	70	700
Levadura seca	1.5	15
Sal	2	20
Aceite de oliva	2	20

Nota. Los porcentajes de los ingredientes están basados en el % de harina de trigo.

El proceso incluyó mezcla, amasado suave, fermentación prolongada durante 90 minutos, formado manual, reposo y horneado bajo los tratamientos establecidos. La alta hidratación favorece la reacción de Maillard y la caramelización en la corteza, generando variaciones cromáticas importantes.

- **Formulación del pan árabe**

El pan árabe se elaboró utilizando una masa de harina de trigo con 65% de agua respecto al peso de la harina (650 g), 15 g de levadura seca (1,5%) y 20 g de sal (2%), a lo que se añadió 20 g de aceite vegetal (2%). Esta hidratación media-baja favorece una masa fácilmente manejable, adecuada para dar forma plana y permitir una cocción rápida, típica de panes árabes tipo pita, donde se busca una miga fina-porosa y una ligera inflación durante la cocción (Cauvain & Young, 2018; Cauvain, 2011). La sal al 2% contribuye a la formación y estabilidad de la red de gluten, mejora el sabor y regula la actividad fermentativa de la levadura, mientras que el 1,5% de levadura seca proporciona una fermentación controlada, suficiente para desarrollar acidez y aroma sin exceder la acidez residual. El aceite vegetal, al 2%, actúa como lubricante de la masa, mejora la suavidad de la miga y contribuye a retrasar ligeramente la recristalización del almidón, prolongando la frescura superficial del producto (Delcour & Hoskeney, 2010; Cauvain & Young, 2018).

Tabla 8*Formulación del pan árabe*

Ingrediente	Porcentaje (%)	Cantidad (g)
Harina de trigo	100	1000
Agua	65	650
Levadura seca	1.5	15
Sal	2	20
Aceite vegetal	2	20

Nota. Los porcentajes de los ingredientes están basados en el % de harina de trigo.

El proceso de elaboración consistió en la mezcla de ingredientes, amasado durante 8 minutos, fermentación durante 45 minutos, formado de discos y horneado bajo los tratamientos establecidos. Este tipo de pan presenta una corteza delgada y uniforme, lo que facilita la medición del color mediante colorimetría y visión por computadora.

Todos los datos obtenidos fueron organizados en matrices de registro para su posterior análisis estadístico mediante correlaciones, prueba de chi-cuadrado y prueba de Tukey, permitiendo evaluar la concordancia entre los métodos de medición del color y la influencia de las condiciones de horneado en la variación cromática de los productos de panificación.

3.4 Técnicas para el procesamiento de la información

El procesamiento de la información se realizó mediante técnicas de estadística descriptiva e inferencial, con el fin de analizar los valores cromáticos obtenidos mediante colorimetría tradicional y visión por computadora en los productos de panificación evaluados.

En primer lugar, se aplicó estadística descriptiva, calculando medias, desviaciones estándar y valores promedio de los parámetros cromáticos L^* , a^* y b^* en la corteza

y miga de los productos horneados, lo que permitió organizar y resumir los datos obtenidos en los tres experimentos. Estos resultados facilitaron la comparación inicial entre los métodos de medición del color y la identificación de variaciones cromáticas en las muestras analizadas.

Posteriormente, se aplicó la correlación de Pearson para evaluar la relación entre los valores cromáticos obtenidos mediante colorimetría tradicional y visión por computadora en los experimentos de corteza y miga, permitiendo determinar el grado de concordancia entre ambos métodos de medición del color en el espacio CIELAB.

Asimismo, se utilizó la prueba de chi-cuadrado de bondad de ajuste para analizar la elección de los consumidores en los experimentos de corteza y miga, con el propósito de determinar si existían diferencias significativas en la preferencia de los participantes respecto a la representatividad cromática de los métodos de medición del color.

En el tercer experimento se aplicó el análisis de varianza (ANOVA) para evaluar la influencia de las condiciones de horneado (tiempo y temperatura) en la variación del color de pan francés, pan Ciabatta y pan árabe, comparando los valores cromáticos obtenidos mediante colorímetro y visión por computadora. Posteriormente, se utilizó la prueba de Tukey para identificar diferencias significativas entre los tratamientos de horneado, previamente se verificaron los supuestos del ANOVA.

El procesamiento estadístico de los datos se realizó mediante el software JASP, el cual permitió ejecutar los análisis de correlación, chi-cuadrado, ANOVA y pruebas

post hoc, mientras que el procesamiento de imágenes para la visión por computadora se desarrolló mediante Python, utilizando herramientas de análisis digital de imágenes para la obtención de los valores cromáticos en el espacio CIELAB.

De esta manera, las técnicas de procesamiento de la información permitieron analizar de forma objetiva y confiable los datos obtenidos en los tres experimentos, garantizando la validez estadística de los resultados y la adecuada interpretación de la concordancia entre la colorimetría tradicional y la visión por computadora en la medición del color de productos de panificación.

CAPITULO IV. RESULTADOS

4.1 Resultados de la medición del color de la corteza mediante colorimetría tradicional

En la Tabla 9 se muestran los valores de los parámetros cromáticos L^* , a^* y b^* correspondientes a la corteza de las 30 muestras de productos horneados analizadas, obtenidos mediante colorimetría convencional en el espacio de color CIELAB, considerando tres mediciones por cada muestra.

Tabla 9

Resultados de los parámetros CIELAB de la corteza de pan medidos por colorimetría tradicional

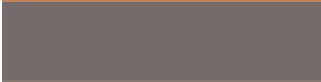
Tipo de muestra	Muestra	Replica	-	CIELAB		
				L^*	a^*	b^*
PAN1	PAN1-1	1		61.41	16.68	31.14
		2		61.21	17.69	33.21
		3		59.52	16.33	30.21
	PAN1-2	1		60.41	17.88	32.24
		2		61.01	16.69	33.01
		3		59.82	16.13	30.11
	PAN1-2	1		61.12	16.68	31.24
		2		60.11	17.43	32.31
		3		59.59	16.98	30.41
PAN2	PAN2-1	1		45.44	3.64	1.14
		2		46.63	4.44	2.40
		3		45.84	3.99	1.30
	PAN2-2	1		45.97	3.82	1.68
		2		43.45	1.99	-1.02
		3		47.10	4.44	2.82
	PAN2-3	1		45.73	3.55	1.22
		2		46.85	4.45	2.49
		3		47.25	4.36	2.65
PAN3	PAN3-1	1		45.06	0.63	-0.58
		2		52.39	5.39	6.58
		3		52.76	5.14	7.21
	PAN3-2	1		45.99	0.82	0.22
		2		53.01	4.47	6.44
		3		52.56	4.55	5.96
	PAN3-3	1		55.19	4.85	8.90
		2		51.84	3.94	6.60
		3		55.32	3.45	6.43
PAN4	PAN4-1	1		43.14	2.52	-2.52
		2		43.51	3.09	-1.25
		3		43.70	3.30	-1.55
	PAN4-2	1		49.00	1.71	1.92
		2		44.05	3.84	-0.82
		3		45.70	5.03	1.74
	PAN4-3	1		43.96	3.90	-0.70
		2		44.58	4.35	0.10
		3		47.78	5.61	4.40

Tipo de muestra	Muestra	Replica	-	CIELAB	
				L*	a* b*
PAN5	PAN5-1	1		46.58	3.47 2.26
		2		45.90	4.89 2.48
		3		47.35	5.33 4.12
	PAN5-2	1		44.92	4.41 1.17
		2		44.71	4.15 1.15
		3		16.61	5.30 3.72
	PAN5-3	1		45.22	4.77 1.82
		2		46.89	5.35 3.44
		3		44.66	4.27 1.81
PAN6	PAN6-1	1		42.79	3.49 -0.53
		2		42.79	3.11 -0.59
		3		43.06	3.03 -0.29
	PAN6-2	1		42.81	3.52 -0.50
		2		43.18	2.99 -0.18
		3		42.82	3.55 -0.16
	PAN6-3	1		41.85	2.74 -1.47
		2		41.48	2.81 -1.59
		3		42.65	3.78 -0.23
PAN7	PAN7-1	1		41.31	2.62 -1.67
		2		42.63	3.50 -0.80
		3		42.97	3.85 -0.65
	PAN7-2	1		42.07	1.58 -1.47
		2		42.55	3.73 -0.97
		3		43.09	4.44 -0.02
	PAN7-3	1		42.78	3.80 -0.69
		2		41.24	2.78 -1.61
		3		40.54	2.85 -1.63
PAN8	PAN8-1	1		46.37	2.97 3.51
		2		43.71	2.04 1.07
		3		45.75	2.53 2.81
	PAN8-2	1		47.36	3.81 4.56
		2		45.10	2.38 2.31
		3		47.82	3.44 4.40
	PAN8-3	1		46.33	2.81 3.42
		2		43.86	2.13 1.34
		3		45.21	3.27 2.82
PAN9	PAN9-1	1		45.57	16.28 28.38
		2		51.22	16.27 29.57
		3		37.76	15.44 25.64
	PAN9-2	1		46.57	16.15 28.28
		2		50.52	16.13 29.17
		3		38.59	15.68 25.60
	PAN9-3	1		46.72	15.78 28.18
		2		52.75	16.31 28.73
		3		38.45	15.87 25.78
PAN10	PAN10-1	1		44.31	4.77 2.26
		2		44.22	50.90 2.31
		3		46.99	5.23 5.42
	PAN10-2	1		43.03	4.33 1.00
		2		44.53	4.69 2.51
		3		45.06	5.12 3.29
	PAN10-3	1		44.31	4.64 1.85
		2		45.92	5.20 4.26
		3		46.48	5.49 4.98

En la Tabla 10 se presentan los valores promedio ($\mu \pm DE$) de los parámetros cromáticos L^* , a^* y b^* de la corteza de las diez muestras de productos horneados evaluadas, determinados mediante colorimetría tradicional en el espacio de color CIELAB.

Tabla 10

Valores promedio ($\mu \pm DE$) de los parámetros CIELAB de la corteza de pan medidos por colorimetría tradicional

Muestra	L^* $\mu \pm DE$	a^* $\mu \pm DE$	b^* $\mu \pm DE$	Color
PAN1	60.71 ± 1.04	16.90 ± 0.71	31.52 ± 1.54	
PAN2	46.03 ± 1.16	3.85 ± 0.79	1.63 ± 1.19	
PAN3	51.57 ± 3.64	3.69 ± 1.78	5.31 ± 3.23	
PAN4	45.05 ± 2.05	3.71 ± 1.21	0.15 ± 2.16	
PAN5	45.87 ± 1.03	4.66 ± 0.64	2.44 ± 1.09	
PAN6	42.60 ± 0.56	3.22 ± 0.37	-0.62 ± 0.54	
PAN7	42.13 ± 0.90	3.24 ± 0.86	-1.06 ± 0.57	
PAN8	45.72 ± 1.42	2.82 ± 0.61	2.92 ± 1.21	
PAN9	44.85 ± 6.76	16.00 ± 0.48	27.86 ± 2.02	
PAN10	44.98 ± 1.26	4.95 ± 0.36	3.10 ± 1.50	

μ : media aritmética; DE : desviación estándar.

4.1.1 Parámetro L^* (luminosidad)

Los valores de L^* mostraron una variación considerable entre las muestras analizadas, indicando diferencias en la claridad u oscuridad de la corteza de los

productos horneados. La muestra PAN1 (pan de molde) presentó el valor más alto de luminosidad ($L^* = 60.71 \pm 1.04$), lo que corresponde a una corteza significativamente más clara. En contraste, las muestras PAN6 (pan de soya) y PAN7 (pan de yema) registraron los valores más bajos de L^* (42.60 ± 0.56 y 42.13 ± 0.90 , respectivamente), evidenciando una coloración más oscura.

La desviación estándar fue, en general, baja para la mayoría de las muestras, lo que indica una buena repetibilidad de las mediciones. No obstante, PAN9 (pan con semillas de linaza) presentó la mayor variabilidad en L^* ($DE = 6.76$), lo que sugiere una mayor heterogeneidad superficial de la corteza.

4.1.2 Parámetro a^* (componente rojo-verde)

El parámetro a^* mostró valores positivos en todas las muestras, lo que indica una predominancia del componente rojo en la coloración de la corteza. Las muestras PAN1 y PAN9 presentaron los valores más elevados de a^* (16.90 ± 0.71 y 16.00 ± 0.48 , respectivamente), asociados a tonalidades marrón-rojizas más intensas. Por el contrario, el resto de las muestras presentó valores de a^* moderados, oscilando entre 2.82 y 4.95, lo que corresponde a una menor intensidad del componente rojo en la corteza.

4.1.3 Parámetro b^* (componente amarillo-azul)

En cuanto al parámetro b^* , se observaron diferencias marcadas entre los productos evaluados. Las muestras PAN1 y PAN9 registraron los valores más altos (31.52 ± 1.54 y 27.86 ± 2.02 , respectivamente), evidenciando una marcada contribución del componente amarillo en la coloración de la corteza. En contraste, las muestras PAN6 y PAN7 presentaron valores negativos de b^* , lo que indica una ligera tendencia hacia

tonalidades azuladas o una ausencia del componente amarillo, característica de cortezas más oscuras y menos doradas.

4.2 Resultados de la medición del color de la corteza de pan mediante visión por computadora

La Tabla 11 resume los valores de color CIELAB (L^* , a^* y b^*) de la corteza de las muestras analizadas mediante visión computacional.

Tabla 11

Resultados de los parámetros CIELAB de la corteza de pan medidos por visión por computadora

Muestra	Numero de Replica	RGB			CIELAB		
		R	G	B	L^*	a^*	b^*
PAN1	1	154	95	22	45.79	18.46	47.85
	2	154	95	22	46.18	19.15	46.98
	3	154	95	22	45.58	18.15	47.18
PAN2	1	133	81	28	39.51	17.20	38.57
	2	131	81	28	39.23	16.28	38.21
	3	129	79	28	38.45	16.54	37.35
PAN3	1	144	104	47	47.02	9.88	37.57
	2	151	116	58	51.13	6.93	36.77
	3	132	97	43	43.70	8.16	35.53
PAN4	1	100	54	28	27.93	18.05	24.90
	2	92	48	25	25.14	17.78	23.16
	3	101	55	27	28.32	17.84	25.96
PAN5	1	109	56	18	29.72	20.48	32.64
	2	115	63	23	32.40	19.31	33.09
	3	116	64	21	32.78	19.09	34.49
PAN6	1	105	53	22	28.40	20.61	29.04
	2	105	54	23	28.65	20.06	28.76
	3	100	48	21	26.38	21.23	27.23
PAN7	1	94	48	24	25.44	18.65	24.19
	2	101	52	26	27.57	19.59	25.70
	3	110	55	22	29.68	21.70	30.61
PAN8	1	127	88	39	40.64	10.88	34.05
	2	124	88	39	40.27	9.48	33.54
	3	115	84	49	38.21	8.46	25.33
PAN9	1	102	59	20	29.42	15.48	30.99
	2	103	58	21	30.12	14.83	29.80
	3	102	59	20	29.10	15.10	30.49
PAN10	1	112	58	22	30.71	20.85	31.75
	2	118	63	24	32.86	20.73	33.19
	3	111	59	20	30.78	19.71	32.78

La Tabla 12 presenta los valores promedio ($\mu \pm DE$) de los parámetros cromáticos L^* , a^* y b^* obtenidos mediante visión por computadora para las diez muestras de productos de panificación analizados. Los valores fueron calculados a partir del procesamiento digital de imágenes de la corteza de pan, considerando múltiples repeticiones por muestra y aplicando la conversión al espacio de color CIELAB. En términos de luminosidad (L^*), se observaron diferencias notables entre las muestras. La muestra PAN3 (pan francés) presentó el mayor valor promedio de L^* (47.28 ± 3.72), indicando una corteza más clara en comparación con las demás muestras. Por el contrario, PAN4 (bizcocho), PAN6 (pan de soya) y PAN7 (pan de yema) mostraron los valores más bajos de L^* , con promedios inferiores a 28, lo que refleja una coloración significativamente más oscura de la corteza. Respecto al parámetro a^* , asociado al eje verde-rojo, todas las muestras presentaron valores positivos, lo que indica una predominancia de tonalidades rojizas en la corteza. Las mayores intensidades de a^* se registraron en PAN6 (20.64 ± 0.59), PAN10 (20.43 ± 0.63) y PAN5 (19.63 ± 0.75), mientras que PAN3 y PAN8 mostraron valores menores, asociados a tonalidades menos intensas en el componente rojo. En cuanto al parámetro b^* , relacionado con el eje azul-amarillo, se evidenció una clara dominancia de tonalidades amarillas en todas las muestras. La muestra PAN1 (pan de molde) presentó el valor más alto de b^* (47.34 ± 0.45), lo que indica una corteza con una fuerte componente amarilla-dorada. Valores elevados de b^* también se observaron en PAN2, PAN3 y PAN5, mientras que PAN4 y PAN7 mostraron los valores más bajos, asociados a tonalidades menos amarillentas.

La desviación estándar registrada para los parámetros cromáticos fue, en general, baja, lo que evidencia una buena repetibilidad del método de visión por computadora

y una adecuada consistencia en la captura y procesamiento de las imágenes. No obstante, algunas muestras como PAN3 y PAN8 presentaron una mayor variabilidad en L^* y b^* , posiblemente asociada a la heterogeneidad superficial de la corteza y a la distribución no uniforme del dorado.

En conjunto, estos resultados demuestran que la visión por computadora permitió caracterizar de manera objetiva y reproducible el color de la corteza de los productos de panificación, capturando diferencias cromáticas asociadas al tipo de pan y a sus características de formulación y horneado.

Tabla 12

Valores promedio ($\mu \pm DE$) de los parámetros CIELAB de la corteza de pan medidos por visión computacional

Muestra	L^* $\mu \pm DE$	a^* $\mu \pm DE$	b^* $\mu \pm DE$	Color
PAN1	45.85 $\pm$ 0.30	18.59 $\pm$ 0.51	47.34 $\pm$ 0.45	
PAN2	39.07 $\pm$ 0.55	16.68 $\pm$ 0.48	38.04 $\pm$ 0.63	
PAN3	47.28 $\pm$ 3.72	8.32 $\pm$ 1.48	36.62 $\pm$ 1.03	
PAN4	27.13 $\pm$ 1.74	17.89 $\pm$ 0.14	24.68 $\pm$ 1.41	
PAN5	31.63 $\pm$ 1.66	19.63 $\pm$ 0.75	33.41 $\pm$ 0.97	
PAN6	27.81 $\pm$ 1.24	20.64 $\pm$ 0.59	28.35 $\pm$ 0.97	
PAN7	27.56 $\pm$ 2.12	19.98 $\pm$ 1.56	26.83 $\pm$ 3.35	
PAN8	39.71 $\pm$ 1.31	9.61 $\pm$ 1.22	30.97 $\pm$ 4.89	
PAN9	29.55 $\pm$ 0.52	15.14 $\pm$ 0.33	30.42 $\pm$ 0.60	
PAN10	31.45 $\pm$ 1.22	20.43 $\pm$ 0.63	32.58 $\pm$ 0.74	

μ : media aritmética; DE: desviación estándar.

4.3 Comparación estadística entre colorimetría tradicional y visión por computadora para corteza de muestras de pan y galleta

Con el propósito de evaluar la concordancia y relación entre las mediciones de color obtenidas mediante colorimetría tradicional y visión por computadora, se realizó un análisis estadístico comparativo considerando los parámetros cromáticos L^* , a^* y b^* en el espacio de color CIELAB. La comparación incluyó: (a) estadísticos descriptivos y prueba de normalidad, (b) análisis de correlación de Pearson y Spearman, y (c) análisis de concordancia mediante el método de Bland–Altman.

Previo a la comparación de métodos, se evaluó la distribución de los datos mediante la prueba de normalidad de Shapiro–Wilk. Los resultados indicaron que, para la mayoría de los parámetros y métodos, los datos no siguieron una distribución normal ($p < .001$), lo que justifica el uso complementario de estadísticos no paramétricos (correlación de Spearman) junto con el análisis paramétrico (correlación de Pearson).

4.3.1 Relación entre métodos (correlación)

La relación entre los valores de L^* , a^* y b^* medidos por colorimetría tradicional (CO) y por visión por computadora (VC) se evaluó mediante los coeficientes de correlación de Pearson (r) y Spearman (ρ). Los resultados se presentan en la Tabla 13.

Para el parámetro L^* , se observó una correlación positiva y significativa entre ambos métodos ($r = 0.701$, $p < .001$; $\rho = 0.753$, $p < .001$), lo que indica que las variaciones en luminosidad registradas por visión computacional siguen, en términos generales, la misma tendencia que las obtenidas con el colorímetro. No obstante, el valor de r

inferior a 0.80 sugiere que la relación, aunque moderada, no es suficientemente fuerte para asumir equivalencia directa entre técnicas.

En el caso del parámetro a^* , la correlación entre a^*CO y a^*VC fue positiva pero baja y no significativa ($r = 0.189$, $p = .316$; $\rho = 0.113$, $p = .550$). Este resultado indica que no existe una asociación lineal ni monótonica consistente entre ambos métodos para el componente rojo-verde, lo que sugiere que la visión computacional no reproduce adecuadamente las variaciones de a^* medidas por el colorímetro.

Para el parámetro b^* , se obtuvo una correlación positiva y significativa entre b^*CO y b^*VC ($r = 0.573$, $p < .001$; $\rho = 0.604$, $p < .001$), evidenciando una asociación moderada entre ambas técnicas. Esto sugiere que la visión computacional captura parcialmente las variaciones del componente amarillo-azul registradas por el colorímetro; sin embargo, la magnitud de la correlación no es suficiente para considerar ambos métodos intercambiables sin ajustes previos.

En conjunto, los análisis de correlación indican que la relación entre métodos es más consistente para L^* y b^* que para a^* , donde la concordancia es claramente limitada. Dado que la correlación por sí sola no evalúa concordancia, se procedió a aplicar el análisis de Bland-Altman para cada parámetro cromático.

Tabla 13

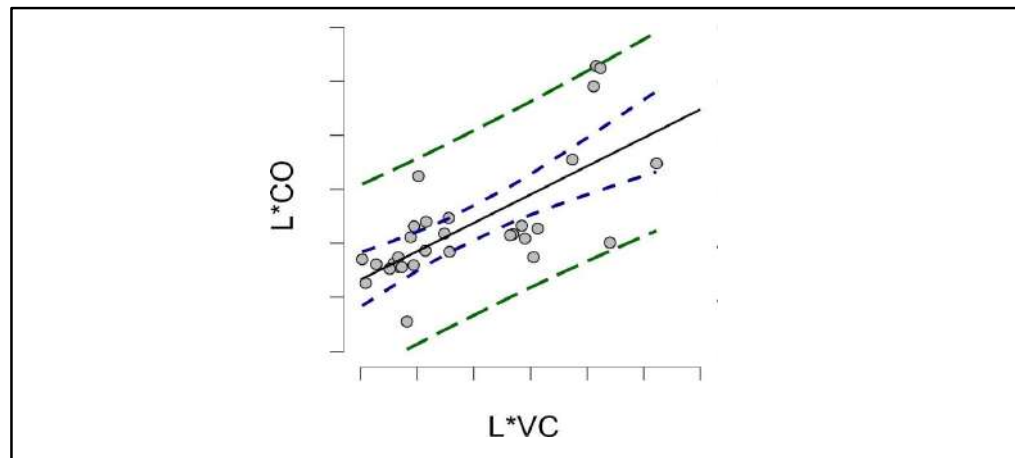
Coefficientes de correlación entre colorimetría tradicional (CO) y visión por computadora (VC) para los parámetros CIELAB

Parámetro	r (Pearson)	p	ρ (Spearman)	p
$L^*CO - L^*VC$	0.701	< .001	0.753	< .001
$a^*CO - a^*VC$	0.189	.316	0.113	.550
$b^*CO - b^*VC$	0.573	< .001	0.604	< .001

La Figura 5 muestra el diagrama de dispersión entre L^*VC y L^*CO con la línea de regresión lineal, su intervalo de confianza (bandas azules) y los límites de predicción (bandas verdes). Se observa una relación lineal positiva entre ambos métodos; sin embargo, los puntos presentan una dispersión moderada alrededor de la recta de regresión, evidenciando discrepancias sistemáticas. En particular, la visión computacional tiende a subestimar los valores más altos de L^* y a sobreestimar los valores más bajos en comparación con el colorímetro. Además, los límites de predicción evidencian una variabilidad considerable entre métodos, lo que sugiere que no son directamente intercambiables sin un proceso previo de calibración.

Figura 5

Relación entre L^* medido por visión computacional (VC) y colorimetría tradicional (CO).



4.3.2 Concordancia entre métodos (Bland–Altman) en muestras de corteza de pan y galleta.

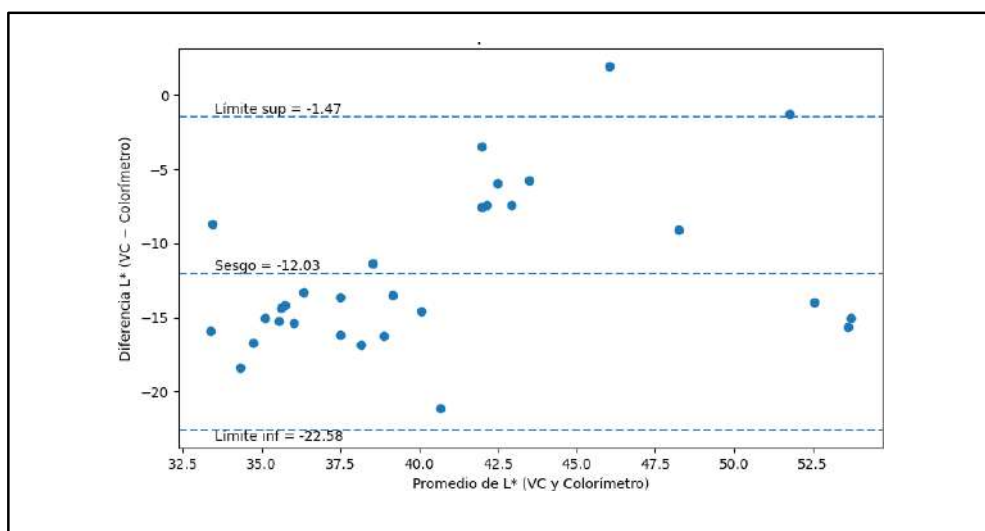
Para evaluar la concordancia y detectar posibles sesgos sistemáticos entre métodos, se aplicó el análisis de Bland–Altman para cada parámetro cromático (L^* , a^* y b^*). Este método permite cuantificar el sesgo promedio entre mediciones y establecer los límites de acuerdo al 95%.

a) L^*

El análisis Bland–Altman para L^* (Figura 6) mostró un sesgo medio negativo de -12.03 unidades ($VC - CO$), lo que indica que, en promedio, la visión computacional subestimó la luminosidad en comparación con el colorímetro. Los límites de acuerdo del 95% se situaron entre -1.47 (límite superior) y -22.58 (límite inferior), evidenciando una dispersión amplia de las diferencias entre métodos. Esto sugiere que, aunque existe una relación lineal entre ambas técnicas, la magnitud de las discrepancias individuales puede ser considerable, limitando su intercambiabilidad directa.

Figura 6.

Gráfico de Bland–Altman para L^* (visión por computadora vs. colorímetro).

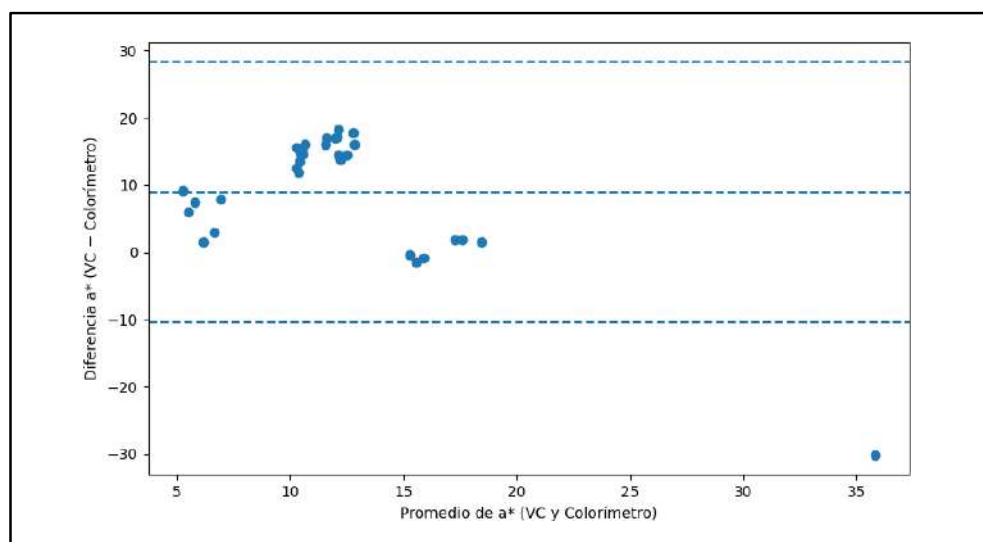


b) a^*

En el caso de a^* , el análisis Bland–Altman (Figura 7) reveló un sesgo medio positivo de 8.94 unidades ($VC - CO$), con una desviación estándar de las diferencias de 9.87 . Los límites de acuerdo al 95% se ubicaron entre -10.41 y 28.29 . Estos resultados indican que la visión computacional tiende a sobreestimar el componente rojo en comparación con el colorímetro y que existe una alta variabilidad en las diferencias entre métodos.

Figura 7.

Gráfico de Bland–Altman para a^* (visión por computadora vs. colorímetro).

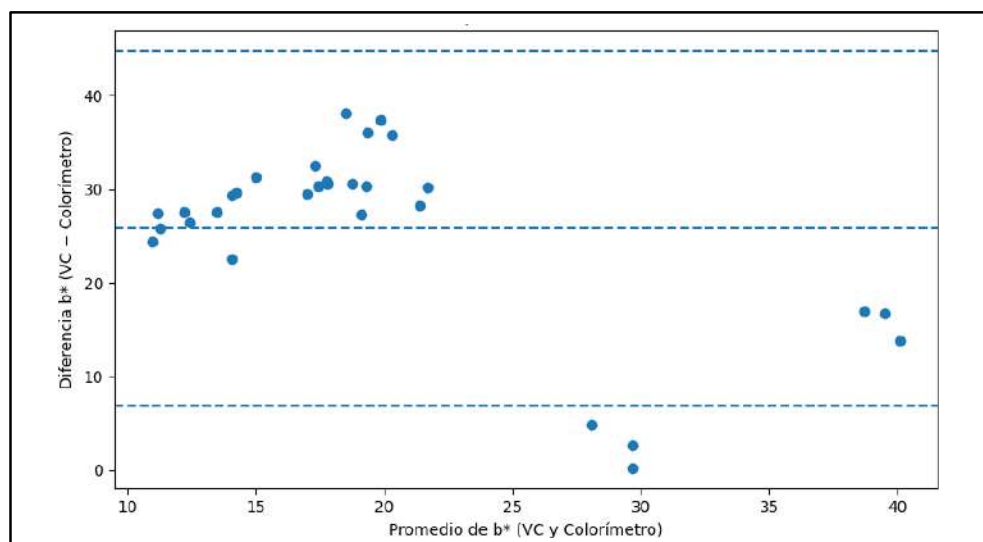


c) b^*

Para b^* , el análisis Bland–Altman (Figura 8) mostró un sesgo medio positivo de 25.84 unidades (VC – CO), con una desviación estándar de 9.66. Los límites de acuerdo del 95% oscilaron entre 6.90 y 44.77, lo que evidencia una sobreestimación sistemática y consistente del componente amarillo por parte de la visión computacional respecto al colorímetro.

Figura 8.

Gráfico de Bland–Altman para b^* (visión por computadora vs. colorímetro).



La diferencia total de color (ΔE) entre las mediciones obtenidas mediante colorimetría tradicional y visión computacional fue elevada en todas las muestras analizadas ($\Delta E = 15.54\text{--}39.23$), lo que indica diferencias cromáticas claramente perceptibles entre ambos métodos. Estos resultados (Tabla 14) sugieren que, aunque la visión computacional permite caracterizar la variación de color de la corteza del pan, los valores obtenidos no son directamente equivalentes a los del colorímetro, por lo que sería necesaria una calibración adicional para mejorar la concordancia entre técnicas.

Tabla 14

Comparación de los parámetros CIELAB de la corteza de pan obtenidos por colorimetría tradicional (CO) y visión computacional (VC) y diferencia total de color (ΔE)

Muestra	Colorímetro			Visión computacional			ΔE
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	
PAN1	60.71	16.9	31.52	45.85	18.59	47.34	21.77
PAN2	46.03	3.85	1.63	39.07	16.68	38.04	39.23
PAN3	51.57	3.69	5.31	47.28	8.32	36.62	31.94
PAN4	45.05	3.71	0.15	27.13	17.89	24.68	33.52
PAN5	45.87	4.66	2.44	31.63	19.63	33.41	37.23
PAN6	42.60	3.22	-0.62	27.81	20.64	28.35	36.90
PAN7	42.13	3.24	-1.06	27.56	19.98	26.83	35.64
PAN8	45.72	2.82	2.92	39.71	9.61	30.97	29.48
PAN9	44.85	16.00	27.86	29.55	15.14	30.42	15.54
PAN10	44.98	4.95	3.10	31.45	20.43	32.58	35.94

4.3.3 Síntesis de la comparación entre métodos

Los análisis de correlación y Bland–Altman evidenciaron diferencias sistemáticas entre los valores obtenidos mediante colorimetría tradicional y visión por computadora para los tres parámetros cromáticos evaluados (L^* , a^* y b^*).

En términos de correlación, se observó una relación positiva y estadísticamente significativa entre ambos métodos para L^* ($r = 0.701$, $p < .001$; $\rho = 0.753$, $p < .001$) y para b^* ($r = 0.573$, $p < .001$; $\rho = 0.604$, $p < .001$). En contraste, para a^* la correlación fue baja y no significativa ($r = 0.189$, $p = .316$; $\rho = 0.113$, $p = .550$).

El análisis de Bland–Altman mostró que las diferencias entre métodos presentaron sesgos sistemáticos en los tres parámetros evaluados:

- Para L^* , el sesgo medio fue de -12.03 unidades ($VC - CO$), con límites de acuerdo del 95% entre -1.47 y -22.58 .
- Para a^* , el sesgo medio fue de 8.94 unidades ($VC - CO$), con una desviación estándar de 9.87 y límites de acuerdo entre -10.41 y 28.29 .
- Para b^* , el sesgo medio fue de 25.84 unidades ($VC - CO$), con una desviación estándar de 9.66 y límites de acuerdo entre 6.90 y 44.77 .

En conjunto, estos resultados muestran que:

- Las diferencias entre visión computacional y colorimetría tradicional fueron consistentes para cada parámetro cromático.
- Los límites de acuerdo fueron relativamente amplios en L^* , a^* y b^* , reflejando una variabilidad considerable en las diferencias individuales entre métodos.

4.4 Validación sensorial de la representación del color de la corteza

Con el propósito de validar perceptualmente la representación del color de la corteza obtenida mediante los métodos evaluados, se realizó una prueba de elección forzada en la que 71 jueces seleccionaron, para cada una de las diez muestras (PAN1–PAN10), la representación que consideraban más fiel al color real de la corteza del producto. En todas las muestras se observó una mayor proporción de elección del método visión computacional (VC) en comparación con colorimetría tradicional (CO) tal y como se presenta en la Tabla 15. Los porcentajes de preferencia por VC oscilaron entre 81.69 % y 98.59 %, mientras que la elección del método CO varió entre 1.41 % y 18.31 %. La muestra PAN1 presentó el mayor porcentaje de preferencia por VC (98.59 %), mientras que PAN9 registró el valor más bajo (81.69 %), aunque mantuvo una mayoría clara a favor de este método.

Tabla 15

Porcentaje de elección del color representativo para corteza de pan por método de visión computacional (VC) vs. colorimetría (CO)

Muestra	Fotografía	Visión computacional (VC)		Colorimetría (CO)	
		Elección (%)	Color	Elección (%)	Color
PAN1		98.59		1.41	
PAN2		97.18		2.82	
PAN3		92.96		7.04	
PAN4		91.55		8.45	
PAN5		92.96		7.04	
PAN6		94.37		5.63	
PAN7		97.18		2.82	
PAN8		92.96		7.04	
PAN9		81.69		18.31	
PAN10		94.37		5.63	

Para determinar si existía una preferencia significativa entre los métodos VC y CO, se aplicó la prueba de chi-cuadrado de bondad de ajuste ($gl = 1$) en cada muestra (Tabla 16), comparando las frecuencias observadas con una distribución esperada equiprobable (50 % – 50 %).

Los resultados evidenciaron diferencias estadísticamente significativas en todas las muestras evaluadas ($p < .001$), observándose una mayor frecuencia de elección del método VC para la representación del color de la corteza.

En la muestra PAN1, 70 de 71 evaluadores (98.6 %) seleccionaron el método VC, mientras que solo 1 evaluador (1.4 %) eligió el método CO, obteniéndose $\chi^2(1, N = 71) = 67.06$, $p < .001$, con un tamaño del efecto $\phi = 0.97$.

En PAN2 y PAN7, el 97.2 % de los evaluadores prefirió el método VC ($\chi^2 = 63.23$, $p < .001$, $\phi = 0.94$). En PAN3, PAN5 y PAN8, la preferencia alcanzó el 93.0 % ($\chi^2 = 52.41$, $p < .001$, $\phi = 0.86$).

En PAN4, el 91.5 % de los participantes seleccionó el método VC ($\chi^2 = 49.03$, $p < .001$, $\phi = 0.83$), mientras que en PAN6 y PAN10 la preferencia fue del 94.4 % ($\chi^2 = 55.90$, $p < .001$, $\phi = 0.89$).

La muestra PAN9 presentó la menor diferencia relativa entre métodos; sin embargo, el 81.7 % de los evaluadores optó por el método VC frente al 18.3 % que eligió CO. Esta diferencia también resultó estadísticamente significativa, $\chi^2(1, N = 71) = 28.52$, $p < .001$, con un tamaño del efecto $\phi = 0.63$.

Los valores de χ^2 oscilaron entre 28.52 y 67.06, mientras que los tamaños del efecto (ϕ) variaron entre 0.63 y 0.97, indicando magnitudes grandes en todas las muestras evaluadas. Estos resultados evidencian una asociación fuerte entre el método de representación y la percepción del color de la corteza por parte de los evaluadores.

Tabla 16

Frecuencia de elección y resultados de la prueba χ^2 para la representación del color de la corteza

Muestra	Visión computacional (n)	Colorimetría (n)	N	χ^2	p	ϕ
PAN1	70	1	71	67.06	< .001	0.97
PAN2	69	2	71	63.23	< .001	0.94
PAN3	66	5	71	52.41	< .001	0.86
PAN4	65	6	71	49.03	< .001	0.83
PAN5	66	5	71	52.41	< .001	0.86
PAN6	67	4	71	55.90	< .001	0.89
PAN7	69	2	71	63.23	< .001	0.94
PAN8	66	5	71	52.41	< .001	0.86
PAN9	58	13	71	28.52	< .001	0.63
PAN10	67	4	71	55.90	< .001	0.89

Nota. χ^2 : prueba de chi-cuadrado de bondad de ajuste; ϕ : coeficiente Phi.

4.5 Resultados de la medición del color de la miga mediante colorimetría tradicional

La Tabla 17 se presenta los valores de color de la miga de pan correspondientes a los tratamientos evaluados (PAN1–PAN10), determinados mediante colorimetría tradicional utilizando el sistema CIELAB (L^* , a^* , b^*). Para cada tratamiento se analizaron tres muestras independientes con tres réplicas por muestra, obteniéndose un total de nueve mediciones por tratamiento.

Tabla 17

Resultados de los parámetros CIELAB de la miga de pan medidos por colorimetría tradicional

Tipo de muestra	Muestra	Réplica	L*	CIELAB	
				a*	b*
PAN1	PAN1-1	1	48.34	-0.85	-1.68
		2	47.97	-0.72	-1.04
		3	49.69	-0.57	-0.36
	PAN1-2	1	50.92	-0.84	-0.63
		2	47.53	-0.98	-1.66
		3	50.09	-0.69	-0.73
	PAN1-3	1	49.04	-0.70	-0.66
		2	46.87	-0.88	-1.30
		3	49.37	-0.71	-0.63
PAN2	PAN2-1	1	52.42	0.00	1.77
		2	50.47	0.15	1.35
		3	57.23	0.09	3.91
	PAN2-2	1	56.11	0.17	3.96
		2	53.79	0.23	2.65
		3	51.51	0.91	2.39
	PAN2-3	1	56.49	0.19	3.84
		2	53.87	0.88	4.45
		3	57.09	0.48	4.30
PAN3	PAN3-1	1	59.52	-0.22	3.33
		2	54.94	-0.80	2.36
		3	61.74	0.24	4.52
	PAN3-2	1	59.65	-0.18	3.93
		2	60.93	0.13	3.56
		3	60.29	-0.08	3.78
	PAN3-3	1	59.16	-0.11	3.81
		2	60.03	-0.13	3.60
		3	59.27	-0.05	4.29
PAN4	PAN4-1	1	55.71	-0.73	7.22
		2	57.14	-0.76	7.36
		3	58.72	-0.23	8.82
	PAN4-2	1	57.42	-0.62	8.02
		2	58.71	-0.37	8.72
		3	58.67	-0.08	9.76
	PAN4-3	1	58.43	-0.57	7.75
		2	59.65	-0.34	8.69
		3	60.20	-0.25	8.59
PAN5	PAN5-1	1	58.50	0.10	5.27
		2	58.91	0.20	5.39
		3	57.47	0.31	5.63
	PAN5-2	1	58.32	0.07	4.95
		2	59.53	0.55	5.86

Tipo de muestra	Muestra	Réplica	–	CIELAB	
				L*	a* b*
	PAN5-3	3		60.65	0.28 5.14
		1		59.90	0.15 5.05
		2		61.02	0.30 5.07
		3		58.17	0.22 5.49
PAN6	PAN6-1	1		56.90	-0.48 3.19
		2		55.20	-0.05 3.69
		3		55.75	-0.22 3.94
	PAN6-2	1		56.92	-0.11 3.83
		2		56.91	-0.17 3.84
		3		57.44	-0.07 4.45
	PAN6-3	1		56.74	-0.24 3.97
		2		57.55	-0.10 4.46
		3		57.11	-0.20 3.68
PAN7	PAN7-1	1		59.66	-0.46 7.01
		2		59.06	-0.53 7.84
		3		60.30	-0.14 8.08
	PAN7-2	1		58.10	-0.54 7.11
		2		59.10	-0.31 7.90
		3		60.23	-0.09 8.34
	PAN7-3	1		59.17	-0.19 8.23
		2		59.73	-0.27 7.90
		3		60.24	-0.03 8.22
PAN9	PAN9-1	1		42.52	-0.38 -1.53
		2		40.31	-0.65 -2.67
		3		41.50	-0.29 -1.69
	PAN9-2	1		41.54	-0.49 -2.23
		2		41.56	-0.46 -1.93
		3		43.19	0.12 -0.83
	PAN9-3	1		40.78	-0.74 -2.63
		2		43.62	-0.30 -0.93
		3		42.80	-0.20 -1.25
PAN10	PAN10-1	1		76.42	3.85 19.89
		2		75.92	4.01 19.76
		3		76.49	4.17 20.93
	PAN10-2	1		78.73	4.31 20.15
		2		79.53	3.61 19.79
		3		78.53	3.70 20.18
	PAN10-3	1		77.18	4.05 19.43
		2		78.54	3.95 19.66
		3		77.23	4.51 21.40

NOTA: En la muestra PAN8 por tratarse de una galleta no se midió el color de miga.

El parámetro L^* representa la luminosidad del producto, donde valores mayores indican una miga más clara. En los tratamientos evaluados, los valores de L^* oscilaron entre 40.31 y 79.53. Los valores más bajos se observaron en el tratamiento PAN9, lo que indica una miga más oscura, mientras que PAN10 presentó los valores más altos, asociados a una mayor luminosidad.

El parámetro a^* indica la tendencia hacia tonalidades verdes (valores negativos) o rojas (valores positivos). En la mayoría de los tratamientos se observaron valores cercanos a cero o ligeramente negativos, lo que sugiere una leve tendencia hacia tonalidades verdosas. No obstante, el tratamiento PAN10 presentó valores positivos más elevados, indicando una mayor tendencia hacia tonalidades rojizas.

Por su parte, el parámetro b^* representa la tendencia hacia tonalidades azules (valores negativos) o amarillas (valores positivos). La mayoría de los tratamientos presentó valores positivos, lo que indica predominio de tonalidades amarillas características de la miga de pan. En contraste, el tratamiento PAN9 registró valores negativos, evidenciando una ligera tendencia hacia tonalidades azuladas.

Los resultados muestran variaciones en los parámetros colorimétricos de la miga entre los diferentes tratamientos evaluados, lo que evidencia diferencias en las características visuales del producto.

En la Tabla 18 se presentan los valores promedio ($\mu \pm DE$) de los parámetros cromáticos L^* , a^* y b^* de la corteza de las diez muestras de productos horneados

evaluadas, determinados mediante colorimetría tradicional en el espacio de color CIELAB.

Tabla 18

Valores promedio ($\mu \pm DE$) de los parámetros CIELAB de la miga de pan medidos por colorimetría tradicional

Muestra	L* $\mu \pm DE$	a* $\mu \pm DE$	b* $\mu \pm DE$	Color
PAN1	48.87 $\pm$ 1.30	-0.77 $\pm$ 0.13	-0.97 $\pm$ 0.48	
PAN2	54.33 $\pm$ 2.52	0.34 $\pm$ 0.34	3.18 $\pm$ 1.16	
PAN3	59.50 $\pm$ 1.90	-0.13 $\pm$ 0.29	3.69 $\pm$ 0.62	
PAN4	58.29 $\pm$ 1.36	-0.44 $\pm$ 0.24	8.33 $\pm$ 0.81	
PAN5	59.16 $\pm$ 1.19	0.24 $\pm$ 0.14	5.32 $\pm$ 0.30	
PAN6	56.72 $\pm$ 0.77	-0.18 $\pm$ 0.13	3.89 $\pm$ 0.39	
PAN7	59.51 $\pm$ 0.73	-0.28 $\pm$ 0.19	7.85 $\pm$ 0.48	
PAN9	41.98 $\pm$ 1.12	-0.38 $\pm$ 0.25	-1.74 $\pm$ 0.68	
PAN10	77.62 $\pm$ 1.25	4.02 $\pm$ 0.29	20.13 $\pm$ 0.64	

μ : media aritmética; DE: desviación estándar.

4.6 Resultados de la medición del color de la miga de pan mediante visión por computadora

La Tabla 19 resume los valores de color CIELAB (L^* , a^* y b^*) de la miga de las muestras analizadas mediante visión computacional.

Tabla 19

Resultados de los parámetros CIELAB de la miga de pan medidos por visión por computadora

Muestra	Numero de Replica	RGB			CIELAB		
		R	G	B	L*	a*	b*
PAN1	1	166	153	106	63.29	-2.38	26.47
	2	167	155	108	63.95	-2.81	26.27
	3	167	154	102	63.58	-3.00	29.04
PAN2	1	155	143	103	59.52	-1.82	22.94
	2	151	136	96	57.11	-0.51	23.57
	3	149	133	91	56.01	-0.30	24.87
PAN3	1	165	157	115	64.44	-3.80	23.08
	2	163	152	109	62.80	-2.69	24.14
	3	159	147	103	60.97	-2.37	24.94
PAN4	1	155	144	69	59.29	-6.05	40.76
	2	155	143	68	59.00	-5.59	40.92
	3	154	142	66	58.61	-5.65	41.44
PAN5	1	165	151	96	62.49	-2.89	30.83
	2	164	151	99	62.45	-2.97	29.14
	3	162	149	97	61.69	-2.94	29.20
PAN6	1	164	150	99	62.17	-2.42	28.79
	2	167	153	105	63.36	-2.09	27.13
	3	165	150	98	62.25	-2.12	29.44
PAN7	1	163	151	81	62.10	-5.29	38.19
	2	167	156	84	63.86	-5.99	38.88
	3	162	149	75	61.38	-5.19	40.36
PAN9	1	137	108	59	47.44	5.29	31.51
	2	140	111	62	48.63	5.18	31.39
	3	139	112	62	48.79	4.15	31.56
PAN10	1	163	148	84	61.31	-3.37	35.68
	2	166	150	84	62.14	-3.18	36.75
	3	165	148	84	61.50	-2.52	35.95

NOTA: En la muestra PAN8 por tratarse de una galleta no se midió el color de miga.

Los resultados obtenidos muestran variaciones en los parámetros cromáticos de la miga entre las diferentes muestras analizadas. En relación con la luminosidad (L^*), los valores oscilaron aproximadamente entre 47.44 y 64.44, evidenciando diferencias en la claridad de la miga. La mayor luminosidad se registró en PAN3 ($L^* = 64.44$), lo que indica una miga más clara, mientras que PAN9 ($L^* = 47.44\text{--}48.79$) presentó los valores más bajos, reflejando una tonalidad más oscura en comparación con las demás muestras.

En cuanto al parámetro a^* , que representa la tendencia hacia tonalidades rojas (+) o verdes (-), la mayoría de las muestras presentaron valores negativos, indicando una ligera tendencia hacia tonalidades verdosas en la miga. Las muestras PAN1, PAN3, PAN5, PAN6, PAN7 y PAN10 mostraron valores de a^* entre aproximadamente -2.0 y -6.0 . En contraste, PAN9 presentó valores positivos ($4.15\text{--}5.29$), evidenciando una mayor tendencia hacia tonalidades rojizas.

Respecto al parámetro b^* , asociado a la variación entre tonos amarillos (+) y azules (-), todas las muestras mostraron valores positivos, lo que indica predominio de tonalidades amarillas en la miga. Los valores más altos se observaron en PAN4 ($b^* \approx 40.76\text{--}41.44$) y PAN7 ($b^* \approx 38.19\text{--}40.36$), lo que sugiere una mayor intensidad de tonalidades amarillentas en estas muestras. Por otro lado, las muestras PAN2 y PAN3 presentaron valores de b^* relativamente menores, indicando una menor saturación de este tono.

Asimismo, la variabilidad entre réplicas fue relativamente baja dentro de cada muestra, lo que sugiere una consistencia en la medición del color mediante visión por computadora. Estos resultados evidencian que la técnica permite obtener información

objetiva y reproducible sobre las características cromáticas de la miga de pan, facilitando la comparación entre diferentes formulaciones.

Tabla 20

Valores promedio ($\mu \pm DE$) de los parámetros CIELAB de la miga de pan medidos por visión computacional

Muestra	L* $\mu \pm DE$	a* $\mu \pm DE$	b* $\mu \pm DE$	Color
PAN1	63.61 $\pm$ 0.33	-2.73 $\pm$ 0.32	27.26 $\pm$ 1.54	
PAN2	57.54 $\pm$ 1.80	-0.88 $\pm$ 0.82	23.79 $\pm$ 0.98	
PAN3	62.73 $\pm$ 1.74	-2.95 $\pm$ 0.75	24.05 $\pm$ 0.93	
PAN4	58.97 $\pm$ 0.34	-5.76 $\pm$ 0.25	41.04 $\pm$ 0.36	
PAN5	62.21 $\pm$ 0.45	-2.93 $\pm$ 0.04	29.72 $\pm$ 0.96	
PAN6	62.59 $\pm$ 0.67	-2.21 $\pm$ 0.18	28.45 $\pm$ 1.19	
PAN7	62.45 $\pm$ 1.28	-5.49 $\pm$ 0.44	39.14 $\pm$ 1.11	
PAN9	48.29 $\pm$ 0.74	4.87 $\pm$ 0.63	31.49 $\pm$ 0.09	
PAN10	61.65 $\pm$ 0.44	-3.02 $\pm$ 0.45	36.13 $\pm$ 0.56	

4.7 Comparación estadística entre colorimetría tradicional y visión por computadora para la miga de muestras de pan

Con el propósito de evaluar la concordancia y relación entre las mediciones de color obtenidas mediante colorimetría tradicional y visión por computadora, se realizó un análisis estadístico comparativo considerando los parámetros cromáticos L*, a* y b* en el espacio de color CIELAB para la miga de las muestras de pan. La comparación

incluyó: (a) análisis de correlación de Pearson y Spearman, y (b) evaluación de la relación entre ambos métodos de medición.

Los coeficientes de correlación permiten determinar el grado de asociación entre las mediciones obtenidas mediante ambas técnicas. En este contexto, el coeficiente de Pearson (r) evalúa la relación lineal entre variables continuas, mientras que el coeficiente de Spearman (ρ) permite analizar asociaciones monotónicas sin requerir supuestos estrictos de normalidad.

4.7.1 Relación entre métodos (correlación)

La relación entre los valores de L^* , a^* y b^* medidos por colorimetría tradicional (CO) y por visión por computadora (VC) se evaluó mediante los coeficientes de correlación de Pearson y Spearman. Los resultados se presentan en la Tabla 21.

Para el parámetro L^* , se observó una correlación positiva moderada y significativa entre ambos métodos ($r = 0.533$, $p = 0.004$), lo que indica que las variaciones en luminosidad detectadas mediante visión computacional tienden a seguir la misma tendencia que las registradas por el colorímetro. Sin embargo, el coeficiente de Spearman ($\rho = 0.164$, $p = 0.411$) no resultó significativo, lo que sugiere que la relación monotónica entre ambos métodos es débil y que la correspondencia entre mediciones puede variar entre muestras.

En el caso del parámetro a^* , la correlación entre a^*_{CO} y a^*_{VC} fue muy baja y no significativa ($r = -0.060$, $p = 0.767$; $\rho = 0.119$, $p = 0.553$). Este resultado indica que no existe una asociación consistente entre ambos métodos para el componente rojo-verde del color, lo que sugiere que la visión por computadora presenta limitaciones para reproducir las variaciones de este parámetro en la miga de pan.

Por otro lado, para el parámetro b^* se obtuvo una correlación positiva moderada y significativa entre b^*CO y b^*VC ($r = 0.545$, $p = 0.003$; $\rho = 0.614$, $p < .001$). Estos resultados indican que la visión por computadora logra captar de manera relativamente consistente las variaciones del componente amarillo–azul registradas por el colorímetro, aunque la magnitud de la correlación sugiere que ambos métodos no son completamente equivalentes.

En conjunto, los resultados indican que la relación entre ambos métodos de medición es moderada para los parámetros L^* y b^* , mientras que para a^* la correspondencia es limitada. Estos hallazgos sugieren que la visión por computadora puede representar adecuadamente algunas características cromáticas de la miga, especialmente aquellas asociadas a la luminosidad y a la tonalidad amarilla, aunque su capacidad para reproducir con precisión el componente rojo–verde es menor.

Tabla 21

Coefficientes de correlación entre colorimetría tradicional (CO) y visión por computadora (VC) para los parámetros CIELAB en miga de pan.

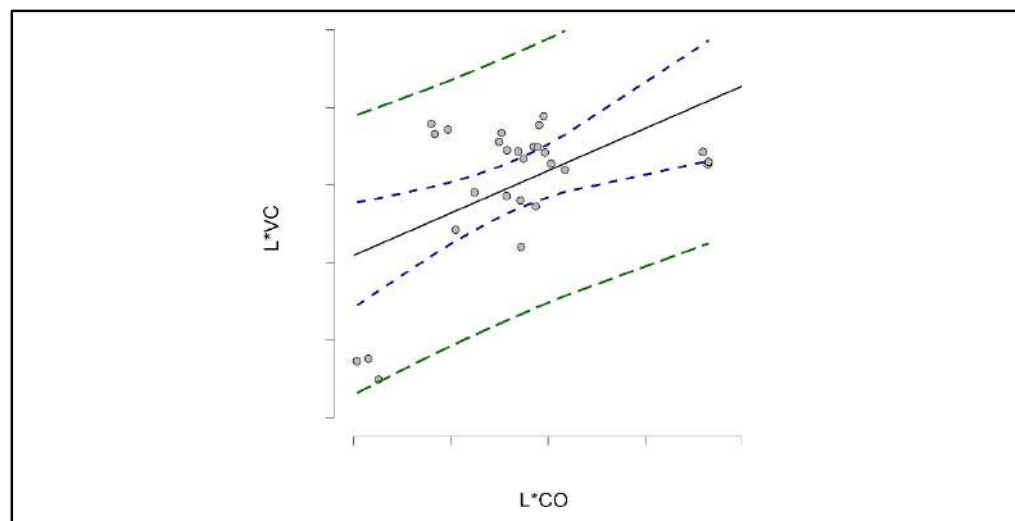
Parámetro	r (Pearson)	p	ρ (Spearman)	p
$L^*CO - L^*VC$	0.533	0.004	0.164	0.411
$a^*CO - a^*VC$	-0.060	0.767	0.119	0.553
$b^*CO - b^*VC$	0.545	0.003	0.614	< .001

Nota. CO = colorimetría tradicional; VC = visión por computadora. r = coeficiente de correlación de Pearson; ρ = coeficiente de correlación de Spearman; p = nivel de significancia estadística.

La Figura 9 muestra el diagrama de dispersión entre los valores de L^* obtenidos mediante colorimetría tradicional y visión por computadora. Cada punto representa una observación correspondiente a las muestras analizadas. La línea continua indica la recta de regresión lineal, mientras que las líneas discontinuas azules representan el intervalo de confianza del 95 %, y las líneas discontinuas verdes corresponden al intervalo de predicción del modelo.

Figura 9

Relación entre los valores de luminosidad L^* obtenidos mediante colorimetría tradicional (CO) y visión por computadora (VC) en la miga de las muestras de pan.



Se observa una tendencia positiva entre ambas variables, lo que indica que a medida que aumentan los valores de L^* medidos por el colorímetro, también tienden a incrementarse los valores estimados mediante visión por computadora. Este comportamiento es consistente con el análisis de correlación obtenido previamente ($r = 0.533$, $p = 0.004$), que sugiere una relación moderada y estadísticamente significativa entre ambos métodos para el parámetro de luminosidad.

No obstante, la dispersión observada alrededor de la recta de regresión indica que existe variabilidad entre las mediciones de ambas técnicas, lo que sugiere que, si bien la visión por computadora puede captar la tendencia general de la luminosidad de la miga, las mediciones no son completamente equivalentes a las obtenidas mediante colorimetría tradicional.

4.7.2 Concordancia entre métodos (Bland–Altman) en muestras de miga

Con el fin de evaluar la concordancia entre los métodos de medición del color en la miga de pan y detectar posibles sesgos sistemáticos, se aplicó el análisis de Bland–Altman para cada uno de los parámetros cromáticos del sistema CIELAB (L^* , a^* y b^*). Este método permite determinar el sesgo promedio entre las mediciones obtenidas por ambos métodos y establecer los límites de acuerdo al 95%, lo que facilita analizar el nivel de concordancia y la variabilidad en la determinación del color de la miga de pan.

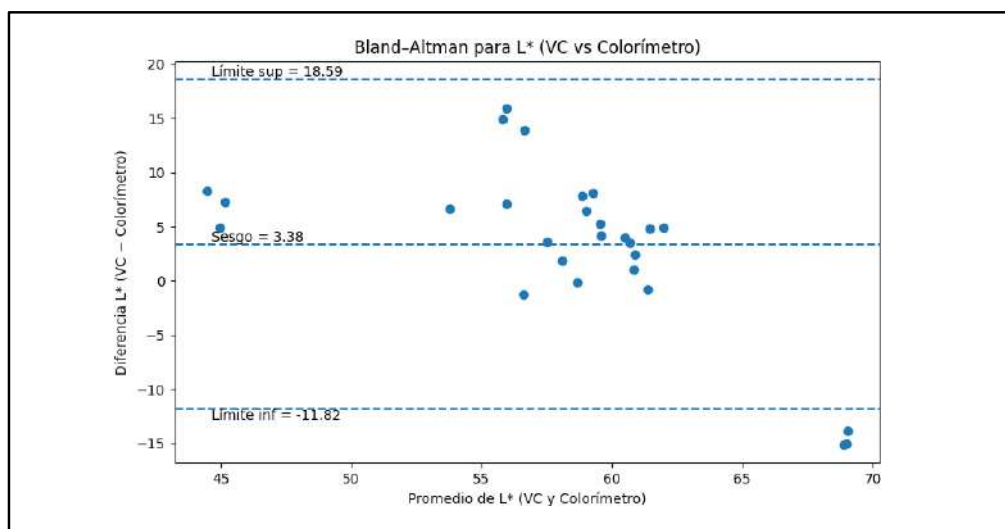
a) L^*

El gráfico de Bland–Altman para L^* (Figura 10) muestra un sesgo promedio de 3.38, con límites de concordancia de -11.82 a 18.59 . La mayoría de los puntos se encuentran dentro de estos límites, lo que indica una concordancia aceptable entre ambos métodos para la medición de la luminosidad de la miga de pan. El sesgo positivo observado sugiere que, en promedio, la visión computacional tiende a registrar valores de L^* ligeramente mayores que los obtenidos mediante colorímetro. No obstante, se observan algunos puntos cercanos o fuera del límite inferior en valores altos del promedio de L^* , lo que podría indicar variaciones puntuales entre métodos en muestras específicas de miga. En general, la dispersión de los datos no muestra una tendencia clara de incremento de error con el aumento del promedio, por lo que no se evidencia un sesgo proporcional marcado. Los resultados sugieren que

la visión computacional presenta un buen nivel de concordancia con el colorímetro para la medición de la luminosidad de la miga.

Figura 10.

Gráfico de Bland–Altman para L^* (visión por computadora vs. colorímetro).



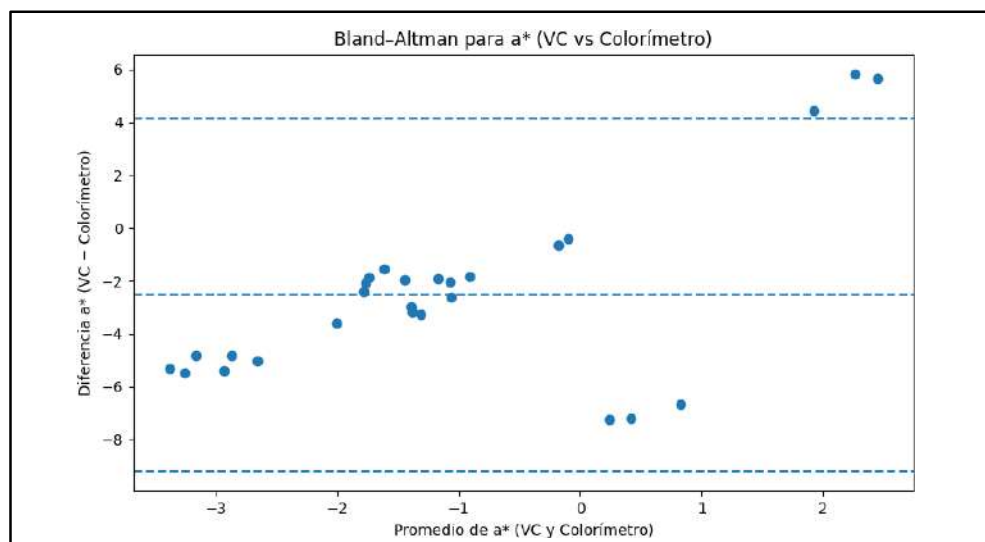
b) a^*

En el parámetro a^* , el gráfico (Figura 11) evidencia un sesgo negativo de -2.53 , lo que indica que la visión computacional tiende a registrar valores menores de a^* en comparación con el colorímetro. La mayor parte de los puntos se distribuye dentro de los límites de concordancia, aunque se observa una mayor dispersión de los datos respecto al parámetro L^* . Además, algunos puntos se aproximan o superan los límites superiores e inferiores, lo que sugiere variabilidad entre métodos en determinadas muestras de miga. El sesgo negativo indica que el sistema de visión computacional subestima ligeramente el componente rojizo de la miga en relación con el método instrumental. Esta diferencia puede estar asociada a factores como condiciones de iluminación, calibración de la cámara o procesamiento de imagen. En términos generales, la concordancia entre métodos para a^* puede considerarse moderada, con

una ligera tendencia sistemática a valores menores en la medición mediante visión computacional.

Figura 11.

Gráfico de Bland–Altman para a^* (visión por computadora vs. colorímetro).



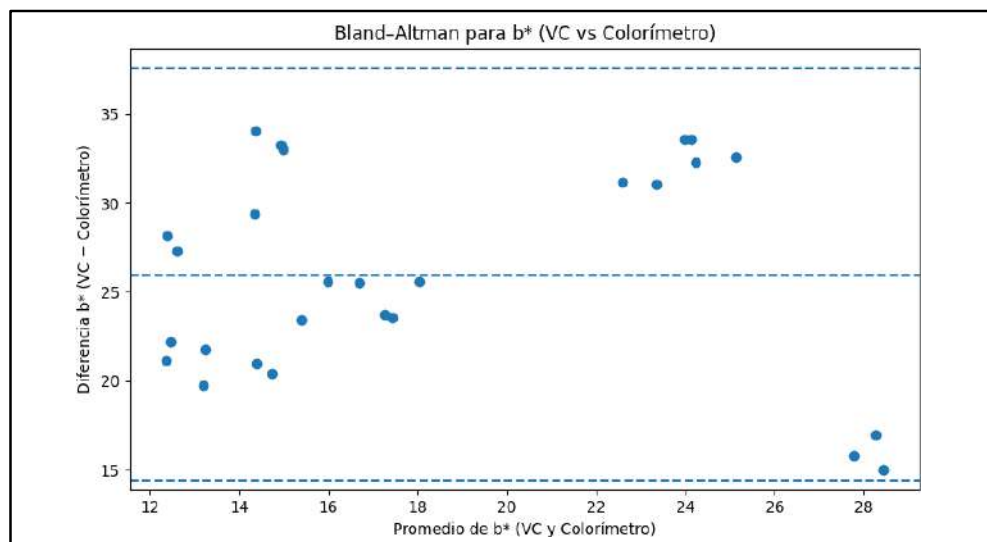
c) b^*

El análisis de Bland–Altman para b^* (Figura 12) muestra un sesgo promedio cercano a 25.96, con límites de concordancia aproximados entre 14 y 37. Este sesgo considerablemente mayor que en los otros parámetros indica que la visión computacional registra valores de b^* significativamente más altos que el colorímetro. Esto refleja una sobreestimación sistemática del componente amarillo de la miga de pan cuando se utiliza el método basado en imágenes. Aunque la mayoría de los puntos permanece dentro de los límites de concordancia, se observa una separación clara entre grupos de valores, lo que podría sugerir diferencias de escala o calibración entre ambos métodos. Por lo tanto, el parámetro b^* presenta la menor concordancia entre los métodos evaluados, indicando que la medición del componente amarillo de

la miga mediante visión computacional requiere ajustes o calibraciones adicionales para mejorar su precisión.

Figura 12

Gráfico de Bland–Altman para b^* (visión por computadora vs. colorímetro).



El análisis de Bland–Altman evidenció que la visión computacional presenta una concordancia moderada con el colorímetro para el parámetro L^* , con un sesgo promedio de 3.38 unidades. Sin embargo, para las coordenadas cromáticas a^* y b^* , se observaron desviaciones sistemáticas mayores, particularmente en b^* , lo que indica que el sistema de visión computacional tiende a sobreestimar este parámetro.

La Tabla 22 presenta la comparación de los parámetros cromáticos del sistema CIELAB (L^* , a^* y b^*) de la miga de pan obtenidos mediante colorimetría tradicional y visión computacional, así como la diferencia total de color (ΔE) entre ambos métodos. En general, se observan diferencias notables entre las mediciones, especialmente en el parámetro b^* , donde la visión computacional registra valores

considerablemente mayores en comparación con el colorímetro. Los valores de ΔE oscilaron entre 20.81 y 34.23, lo que indica diferencias cromáticas claramente perceptibles entre ambos métodos de medición. Estas discrepancias sugieren que, aunque la visión computacional permite caracterizar el color de la miga de pan, los resultados obtenidos no son directamente equivalentes a los del colorímetro, evidenciando la necesidad de realizar ajustes o calibraciones adicionales para mejorar la concordancia entre ambas técnicas.

Tabla 22

Comparación de los parámetros CIELAB de la miga de pan obtenidos por colorimetría tradicional (CO) y visión computacional (VC) y diferencia total de color (ΔE)

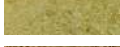
Muestra	Colorímetro			Visión computacional			ΔE
	L*	a*	b*	L*	a*	b*	
PAN1	48.87	-0.77	-0.97	63.61	-2.73	27.26	31.91
PAN2	54.33	0.34	3.18	57.54	-0.88	23.79	20.89
PAN3	59.50	-0.13	3.69	62.73	-2.95	24.05	20.81
PAN4	58.29	-0.44	8.33	58.97	-5.76	41.04	33.15
PAN5	59.16	0.24	5.32	62.21	-2.93	29.72	24.79
PAN6	56.72	-0.18	3.89	62.59	-2.21	28.45	25.33
PAN7	59.51	-0.28	7.85	62.45	-5.49	39.14	31.86
PAN9	41.98	-0.38	-1.74	48.29	4.87	31.49	34.23
PAN10	77.62	4.02	20.13	61.65	-3.02	36.13	23.68

4.7.3 Validación sensorial de la representación del color de la miga

Con el propósito de evaluar la representatividad perceptual del color de la miga de pan, se realizó una prueba sensorial de elección forzada en la que los evaluadores seleccionaron el color que consideraban más representativo entre el obtenido mediante visión computacional (VC) y el determinado por colorimetría tradicional (CO). Los resultados se presentan en la Tabla 23.

Tabla 23

Porcentaje de elección del color representativo para la miga de pan por método de visión computacional (VC) vs. colorimetría (CO)

Muestra	Fotografía	Visión computacional (VC)		Colorimetría (CO)	
		Elección (%)	Color	Elección (%)	Color
PAN1		87.32		12.68	
PAN2		78.87		21.13	
PAN3		76.06		23.94	
PAN4		71.83		28.17	
PAN5		80.28		19.72	
PAN6		77.46		22.54	
PAN7		74.65		25.35	
PAN9		88.73		11.27	
PAN10		81.69		18.31	

En términos generales, se observa una preferencia consistente por el color generado mediante visión computacional en todas las muestras evaluadas. Los porcentajes de elección para VC oscilaron entre 71.83% y 88.73%, mientras que la colorimetría tradicional presentó valores entre 11.27% y 28.17%. Estos resultados indican que, a nivel perceptual, el color obtenido por visión computacional es considerado más representativo de la miga de pan por parte de los evaluadores.

Las mayores preferencias por VC se registraron en las muestras PAN9 (88.73%) y PAN1 (87.32%), lo que sugiere una mejor correspondencia visual entre el color generado por este método y la percepción del color real de la miga en dichas muestras. Por el contrario, las muestras PAN4 (71.83%) y PAN7 (74.65%) presentaron los valores más bajos de elección para VC, evidenciando una menor diferenciación perceptual entre ambos métodos en estos casos.

Los resultados evidencian que, aunque la visión computacional es percibida como el método más representativo del color de la miga de pan, la magnitud de la preferencia es menor en comparación con la observada en la corteza. Esto podría atribuirse a que la miga presenta menor intensidad cromática y contraste visual, lo que dificulta la discriminación entre métodos por parte de los evaluadores.

Los resultados de la prueba de chi-cuadrado para la miga de pan, presentados en la Tabla 24, evidencian diferencias estadísticamente significativas en la elección del color representativo entre los métodos de visión computacional (VC) y colorimetría tradicional (CO) en todas las muestras evaluadas ($p < .001$). Estos resultados indican que la distribución de las frecuencias de elección no es aleatoria, sino que existe una preferencia marcada por uno de los métodos.

En todas las muestras, se observa una mayor frecuencia de elección a favor de la visión computacional, lo que confirma su predominancia como método percibido como más representativo del color real de la miga de pan. Los valores de χ^2 oscilaron entre 13.54 (PAN4) y 42.61 (PAN9), reflejando distintos niveles de intensidad en la preferencia entre métodos.

Tabla 24

Frecuencia de elección y resultados de la prueba χ^2 para la representación del color de la miga

Muestra	Visión computacional (n)	Colorimetría (n)	N	χ^2	p	ϕ
PAN1	62	9	71	39.56	< .001	0.75
PAN2	56	15	71	23.68	< .001	0.58
PAN3	54	17	71	19.28	< .001	0.52
PAN4	51	20	71	13.54	< .001	0.44
PAN5	57	14	71	26.04	< .001	0.61
PAN6	55	16	71	21.42	< .001	0.55
PAN7	53	18	71	17.25	< .001	0.49
PAN9	63	8	71	42.61	< .001	0.77
PAN10	58	13	71	28.52	< .001	0.63

Nota. χ^2 : prueba de chi-cuadrado de bondad de ajuste; ϕ : coeficiente Phi.

En cuanto al tamaño del efecto, los valores del coeficiente Phi (ϕ) variaron entre 0.44 y 0.77, lo que indica efectos de magnitud moderada a alta. Las muestras PAN1 ($\phi = 0.75$) y PAN9 ($\phi = 0.77$) presentaron los mayores tamaños de efecto, evidenciando una preferencia más marcada por la visión computacional. Por otro lado, PAN4 ($\phi = 0.44$) mostró el menor tamaño de efecto, lo que sugiere una menor diferenciación perceptual entre ambos métodos en dicha muestra.

Los resultados confirman que la visión computacional es significativamente preferida para la representación del color de la miga de pan. Sin embargo, en comparación con los resultados obtenidos para la corteza, se observa una ligera disminución en la magnitud del efecto, lo que sugiere que la discriminación perceptual entre métodos es menor en la miga. Este comportamiento puede atribuirse a las características propias de la miga, la cual presenta menor intensidad cromática

y contraste visual, dificultando la diferenciación entre las representaciones de color generadas por ambos métodos.

4.8 Resultados de la comparación del comportamiento del color en distintos tipos de pan bajo condiciones de horneado controladas

4.8.1 Resultados obtenidos en el pan francés

Se realizó un análisis descriptivo de los parámetros de color L^* , a^* y b^* obtenidos mediante colorímetro y visión computacional en pan francés sometido a cuatro tratamientos de horneado ($T1 = 150\text{ °C}-20\text{ min}$, $T2 = 150\text{ °C}-40\text{ min}$, $T3 = 180\text{ °C}-20\text{ min}$ y $T4 = 180\text{ °C}-40\text{ min}$).

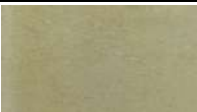
Los resultados obtenidos con el colorímetro mostraron una disminución progresiva del parámetro L^* desde el tratamiento $T1$ ($M = 93.02$, $DE = 1.23$) hasta el tratamiento $T4$ ($M = 70.95$, $DE = 2.55$), lo que indica un incremento en la oscuridad de la corteza a medida que aumentaron la temperatura y el tiempo de horneado. De manera similar, el parámetro a^* aumentó desde $T1$ ($M = 2.86$, $DE = 0.44$) hasta $T4$ ($M = 10.97$, $DE = 1.62$), evidenciando una mayor tonalidad rojiza. El parámetro b^* también mostró un incremento desde $T1$ ($M = 13.23$, $DE = 0.74$) hasta $T4$ ($M = 19.31$, $DE = 1.87$), indicando un aumento de la coloración amarilla.

En el caso de la visión computacional, se observó la misma tendencia en los parámetros de color, con valores de L^* que disminuyeron desde $T1$ ($M = 65.54$, $DE = 0.58$) hasta $T4$ ($M = 56.93$, $DE = 2.25$), mientras que los parámetros a^* y b^* aumentaron progresivamente, alcanzando sus valores máximos en el tratamiento $T4$ ($a^* = 5.14$, $b^* = 45.80$). Estos resultados indican que ambos métodos son capaces de

detectar cambios en el color del pan francés en función de las condiciones de horneado.

Tabla 25

Comparación visual del color de la corteza del pan francés mediante fotografía, visión computacional y colorímetro según tratamiento de horneado

Tratamiento	Temp. (°C)	Tiempo (min)	Fotografía	Visión computacional	Colorímetro
T1	150	20			
T2	150	40			
T3	180	20			
T4	180	40			

El análisis de varianza factorial 2×2 realizado para los datos del colorímetro mostró que la temperatura tuvo un efecto significativo sobre el parámetro L*, $F(1, 32) = 253.53$, $p < 0.001$, al igual que el tiempo de horneado, $F(1, 32) = 115.82$, $p < 0.001$. Asimismo, se encontró una interacción significativa entre temperatura y tiempo, $F(1, 32) = 29.00$, $p < 0.001$.

Para el parámetro a*, la temperatura presentó un efecto significativo, $F(1, 32) = 164.50$, $p < 0.001$, al igual que el tiempo de horneado, $F(1, 32) = 19.73$, $p < .001$, y la interacción también fue significativa, $F(1, 32) = 13.67$, $p < 0.001$.

En el caso del parámetro b*, la temperatura tuvo un efecto significativo, $F(1, 32) = 98.84$, $p < 0.001$, mientras que el tiempo de horneado no presentó efecto significativo, $F(1, 32) = 0.19$, $p = 0.668$, ni la interacción, $F(1, 32) = 0.94$, $p = 0.338$.

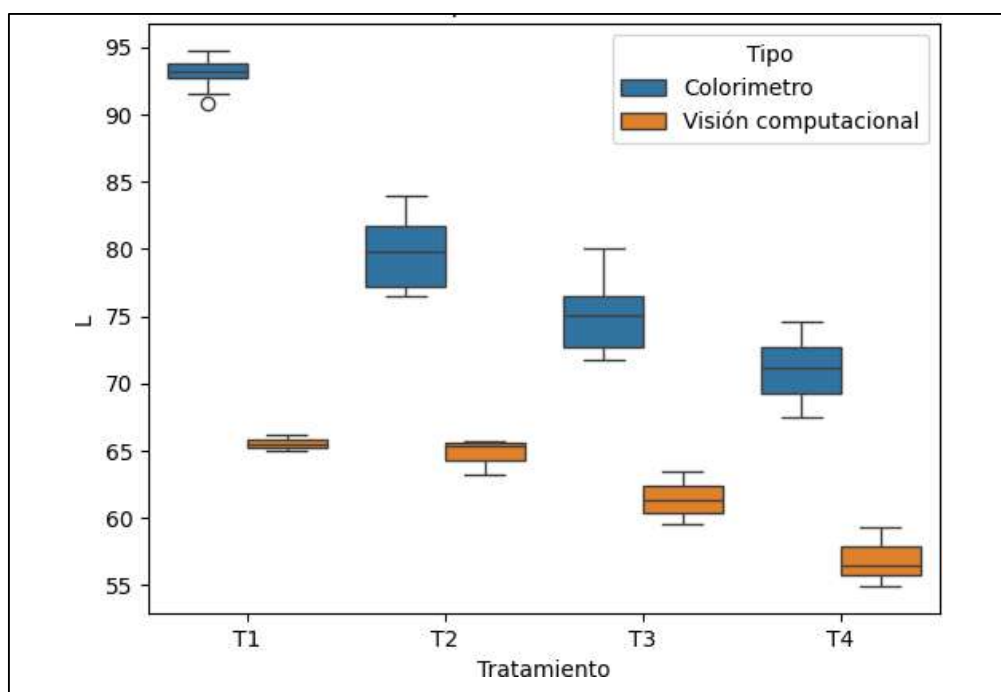
En los datos de visión computacional, la temperatura tuvo un efecto significativo sobre L^* , $F(1, 8) = 39.05$, $p < .001$, así como el tiempo, $F(1, 8) = 7.46$, $p = .026$, sin interacción significativa, $F(1, 8) = 3.80$, $p = 0.087$.

Para a^* , tanto la temperatura, $F(1, 8) = 20.46$, $p = 0.002$, como el tiempo, $F(1, 8) = 5.53$, $p = 0.047$, fueron significativos, sin interacción significativa.

En b^* , la temperatura, $F(1, 8) = 93.96$, $p < .001$, y el tiempo, $F(1, 8) = 8.07$, $p = 0.022$, fueron significativos, sin interacción significativa.

Figura 13

Distribución del parámetro L^* del color de la corteza del pan francés según tratamiento de horneado y método de medición (colorímetro y visión computacional).



Nota. El diagrama de cajas muestra la mediana, los cuartiles, los valores extremos y la dispersión de los datos del parámetro L^* en los tratamientos T1 (150 °C–20 min), T2 (150 °C–40 min), T3 (180 °C–20 min) y T4 (180 °C–40 min).

Figura 14

Distribución del parámetro a^* del color de la corteza del pan francés según tratamiento de horneado y método de medición (colorímetro y visión computacional).

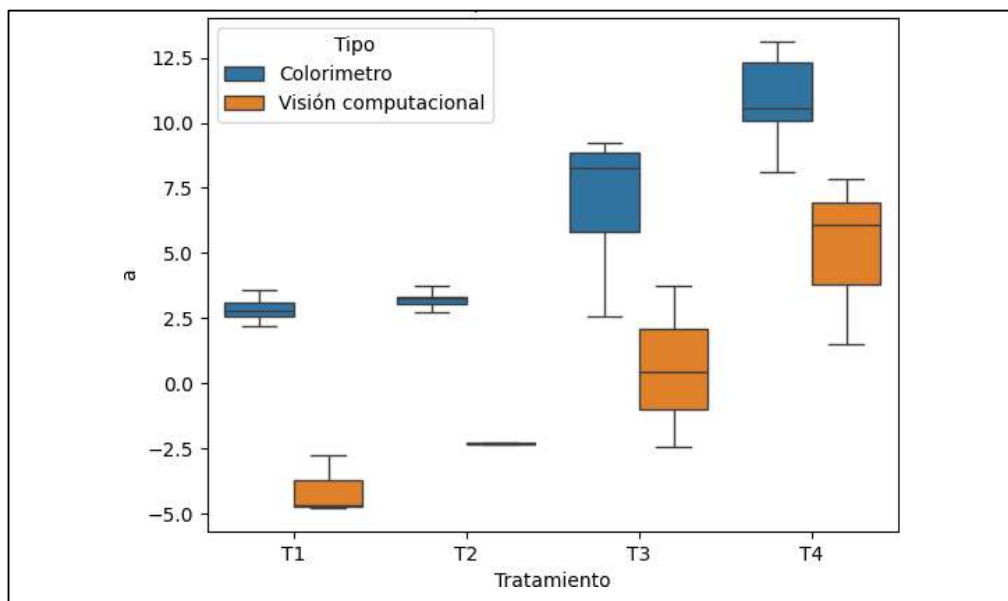
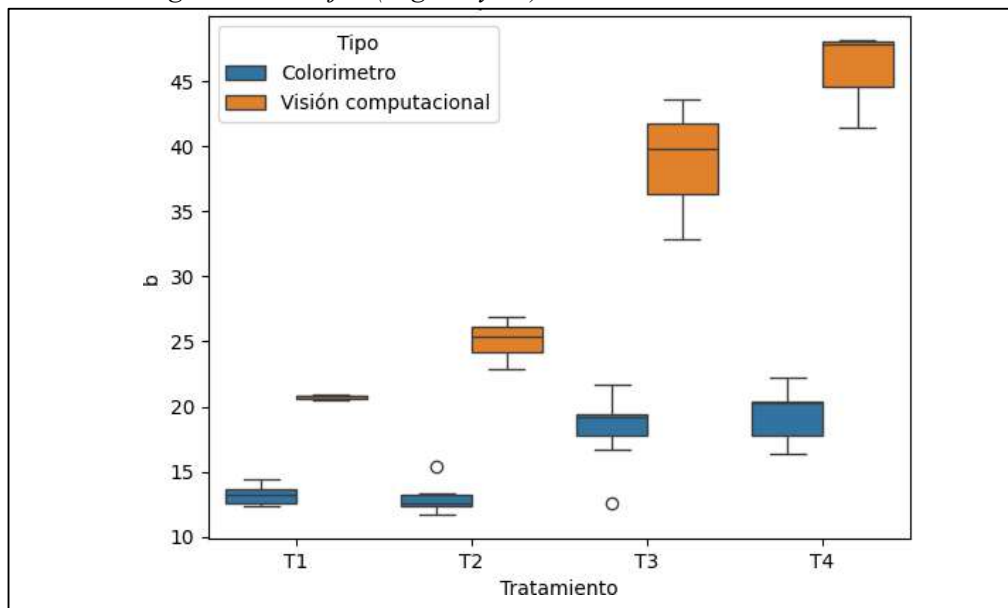


Figura 15

Distribución del parámetro b^* del color de la corteza del pan francés según tratamiento de horneado y método de medición (colorímetro y visión computacional).

Nota. Los diagramas de cajas (Fig. 14 y 15) muestran la mediana, los cuartiles, los



valores extremos y la dispersión de los datos del parámetro a^* y b^* en los tratamientos T1 (150 °C–20 min), T2 (150 °C–40 min), T3 (180 °C–20 min) y T4 (180 °C–40 min).

En la tabla 26 la prueba de Tukey mostró diferencias significativas entre todos los tratamientos en L^* para el colorímetro, evidenciando que cada condición de horneado produce un color distinto. Para el parámetro a^* , no se encontraron diferencias entre T1 y T2, pero sí entre los demás tratamientos, indicando un aumento progresivo del tono rojizo. En b^* , se observaron dos grupos principales (T1–T2 y T3–T4), lo que sugiere que la temperatura influye más que el tiempo. En visión computacional, las diferencias significativas se concentraron principalmente en el tratamiento T4, indicando que las condiciones más intensas generan cambios de color claramente diferenciables.

Tabla 26

Valores medios de L^* , a^* y b^* en pan francés según tratamiento de horneado

Tratamiento	Temp. (°C)	Tiempo (min)	Colorímetro			Visión computacional		
			L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
T1	150	20	93.02±1.23a	2.86±0.44a	13.23±0.74a	65.54±0.58a	-4.06±1.14a	20.71±0.22a
T2	150	40	79.66±2.66b	3.21±0.32a	12.91±1.08a	64.79±1.37a	-2.31±0.03a	25.05±2.00a
T3	180	20	75.39±3.09c	7.15±2.24b	18.48±2.67b	61.42±1.94a	0.59±3.09a	38.77±5.44b
T4	180	40	70.95±2.55d	10.97±1.62c	19.31±1.87b	56.93±2.25b	5.14±3.26b	45.80±3.80b

Nota. Medias con letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p < .05$).

Los resultados demuestran que la temperatura y el tiempo de horneado influyen significativamente en el color del pan francés, siendo la temperatura el factor más determinante. El tratamiento de 180 °C durante 40 minutos produjo la mayor oscuridad y cambios en la tonalidad. Asimismo, la visión computacional mostró tendencias similares al colorímetro, lo que confirma su utilidad como herramienta alternativa para la evaluación del color en productos horneados.

4.8.2 Resultados obtenidos en el pan ciabatta

Se realizó un análisis descriptivo de los parámetros de color L^* , a^* y b^* obtenidos mediante colorímetro y visión computacional en pan Ciabatta sometido a cuatro tratamientos de horneado ($T1 = 150\text{ }^{\circ}\text{C}-20\text{ min}$, $T2 = 150\text{ }^{\circ}\text{C}-40\text{ min}$, $T3 = 180\text{ }^{\circ}\text{C}-20\text{ min}$ y $T4 = 180\text{ }^{\circ}\text{C}-40\text{ min}$).

Los resultados obtenidos con el colorímetro mostraron una disminución progresiva del parámetro L^* desde el tratamiento $T1$ ($M = 85.46$, $DE = 3.05$) hasta el tratamiento $T4$ ($M = 69.27$, $DE = 4.16$), lo que indica un incremento en la oscuridad de la corteza a medida que aumentaron la temperatura y el tiempo de horneado. De manera similar, el parámetro a^* aumentó desde $T1$ ($M = 2.86$, $DE = 0.55$) hasta $T4$ ($M = 8.02$, $DE = 1.61$), evidenciando una mayor tonalidad rojiza. El parámetro b^* mostró un incremento desde $T1$ ($M = 12.63$, $DE = 1.48$) hasta $T3$ ($M = 15.96$, $DE = 1.82$), manteniéndose relativamente estable en $T4$ ($M = 15.39$, $DE = 2.43$), lo que indica un aumento de la coloración amarilla en condiciones de mayor temperatura.

En el caso de la visión computacional, se observó la misma tendencia en los parámetros de color, con valores de L^* que disminuyeron desde $T1$ ($M = 65.52$, $DE = 0.97$) hasta $T4$ ($M = 55.29$, $DE = 3.53$), mientras que los parámetros a^* y b^* aumentaron progresivamente, alcanzando sus valores máximos en el tratamiento $T4$ ($a^* = 8.08$; $b^* = 45.85$). Estos resultados indican que ambos métodos son capaces de detectar cambios en el color del pan Ciabatta en función de las condiciones de horneado.

Tabla 27

Comparación visual del color de la corteza del pan Ciabatta mediante fotografía, visión computacional y colorímetro según tratamiento de horneado

Tratamiento	Temp. (°C)	Tiempo (min)	Fotografía	Visión computacional	Colorímetro
T1	150	20			
T2	150	40			
T3	180	20			
T4	180	40			

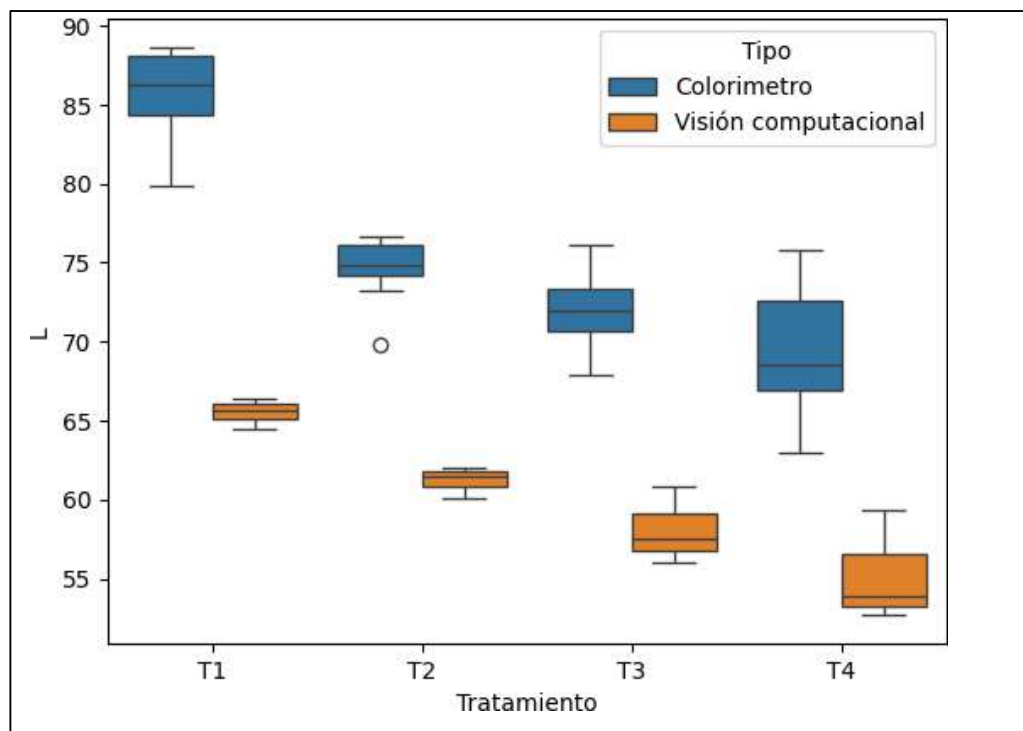
El análisis de varianza factorial 2×2 realizado para los datos del colorímetro mostró que la temperatura tuvo un efecto significativo sobre el parámetro L*, $F(1, 32) = 83.18$, $p < 0.001$, al igual que el tiempo de horneado, $F(1, 32) = 45.80$, $p < 0.001$. Asimismo, se encontró una interacción significativa entre temperatura y tiempo, $F(1, 32) = 15.61$, $p < 0.001$.

Para el parámetro a*, la temperatura presentó un efecto significativo, $F(1, 32) = 97.64$, $p < 0.001$, al igual que el tiempo de horneado, $F(1, 32) = 9.11$, $p = 0.005$, mientras que la interacción no fue significativa, $F(1, 32) = 2.74$, $p = 0.108$. En el caso del parámetro b*, la temperatura tuvo un efecto significativo, $F(1, 32) = 26.58$, $p < 0.001$, mientras que el tiempo de horneado, $F(1, 32) = 0.65$, $p = 0.425$, y la interacción, $F(1, 32) = 0.01$, $p = 0.931$, no presentaron efectos significativos. En los datos de visión computacional, la temperatura tuvo un efecto significativo sobre L*, $F(1, 8) = 26.14$, $p = 0.001$, así como el tiempo, $F(1, 8) = 7.50$, $p = 0.026$, sin interacción significativa, $F(1, 8) = 0.32$, $p = 0.588$. Para a*, tanto la temperatura, $F(1,$

8) = 23.66, $p = 0.001$, como el tiempo, $F(1, 8) = 9.05$, $p = 0.017$, fueron significativos, sin interacción significativa. En b*, la temperatura, $F(1, 8) = 73.09$, $p < 0.001$, y el tiempo, $F(1, 8) = 15.09$, $p = 0.005$, fueron significativos, sin interacción significativa.

Figura 16

Distribución del parámetro L^* del color de la corteza del pan Ciabatta según tratamiento de horneado y método de medición (colorímetro y visión computacional).



Nota. El diagrama de cajas muestra la mediana, los cuartiles, los valores extremos y la dispersión de los datos del parámetro L^* en los tratamientos T1 (150 °C–20 min), T2 (150 °C–40 min), T3 (180 °C–20 min) y T4 (180 °C–40 min).

Figura 17

Distribución del parámetro a^* del color de la corteza del pan Ciabatta según tratamiento de horneado y método de medición (colorímetro y visión computacional).

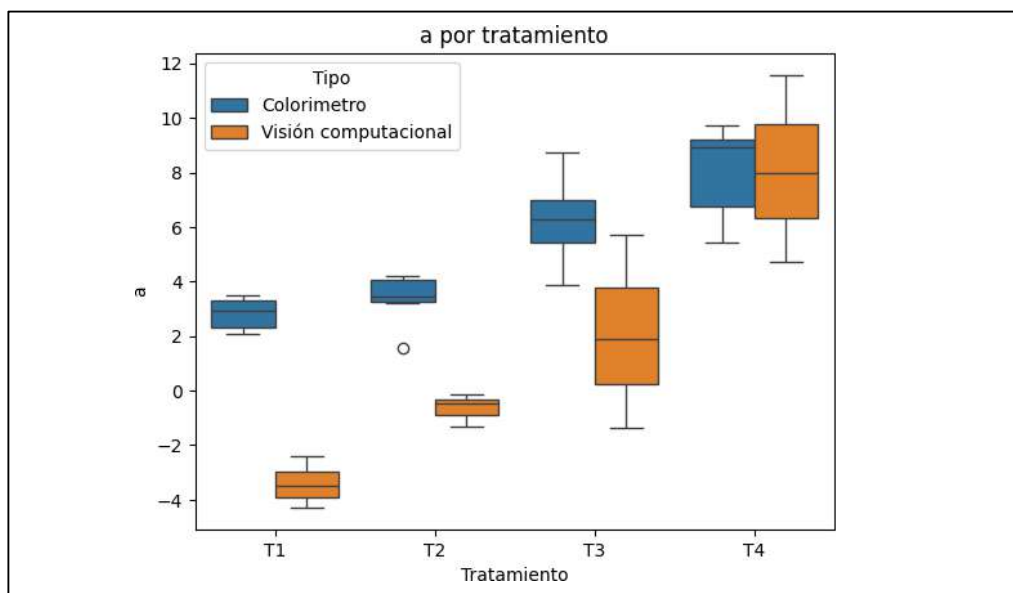
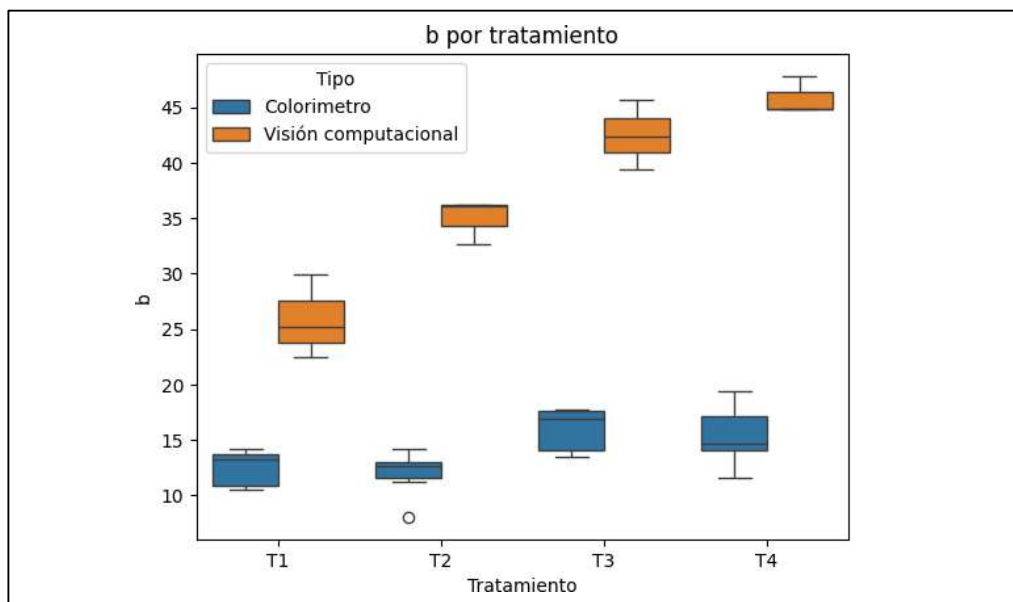


Figura 18

Distribución del parámetro b^* del color de la corteza del pan Ciabatta según tratamiento de horneado y método de medición (colorímetro y visión computacional).



Nota. Los diagramas de cajas (Fig. 17 y 18) muestran la mediana, los cuartiles, los valores extremos y la dispersión de los datos de los parámetros a^* y b^* en los tratamientos evaluados.

En la Tabla 28, la prueba de Tukey mostró diferencias significativas entre T1 y los demás tratamientos en el parámetro L^* para el colorímetro, evidenciando que el tratamiento con menor temperatura presenta mayor luminosidad. En el parámetro a^* , se observaron diferencias significativas entre la mayoría de los tratamientos, indicando un incremento progresivo del tono rojizo conforme aumenta la temperatura y el tiempo de horneado. En b^* , se observaron dos grupos principales (T1–T2 y T3–T4), lo que sugiere que la temperatura es el factor más influyente.

En visión computacional, las diferencias significativas se concentraron principalmente en el tratamiento T4 en los parámetros L^* y a^* , mientras que en b^* se observaron diferencias entre la mayoría de los tratamientos, lo que indica una mayor sensibilidad del análisis digital en la detección del color amarillo.

Tabla 28

Valores medios de L^* , a^* y b^* en pan Ciabatta según tratamiento de horneado

Tratamiento	Temp. (°C)	Tiempo (min)	Colorímetro			Visión computacional		
			L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
T1	150	20	85.46±3.05a	2.86±0.55a	12.63±1.48a	65.52±0.97a	-3.40±0.94a	25.84±3.78a
T2	150	40	74.54±2.09b	3.41±0.79a	12.17±1.77a	61.21±0.99a	-0.64±0.59a	34.98±2.02b
T3	180	20	72.14±2.52bc	6.15±1.50b	15.96±1.82b	58.12±2.45b	2.07±3.54a	42.49±3.12c
T4	180	40	69.27±4.16c	8.02±1.61c	15.39±2.43b	55.29±3.53b	8.08±3.43b	45.85±1.71c

Nota. Medias con letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

El análisis de correlación mostró una alta relación entre el colorímetro y la visión computacional, con valores de $r = 0.96$ para L^* , $r = 0.97$ para a^* y $r = 0.82$ para b^* , lo que indica una fuerte concordancia entre ambos métodos de medición. Asimismo,

el error cuadrático medio (RMSE) fue de 15.55 para L^* , 4.25 para a^* y 24.12 para b^* , mostrando que el parámetro a^* presentó la menor variabilidad entre métodos.

Los resultados demuestran que la temperatura y el tiempo de horneado influyen significativamente en el color del pan Ciabatta, siendo la temperatura el factor más determinante. El tratamiento de 180 °C durante 40 minutos produjo la mayor oscuridad y cambios en la tonalidad.

4.8.3 Resultados obtenidos en el pan árabe

Se realizó un análisis descriptivo de los parámetros de color L^* , a^* y b^* obtenidos mediante colorímetro y visión computacional en pan árabe sometido a cuatro tratamientos de horneado ($T1 = 150\text{ °C}-20\text{ min}$, $T2 = 150\text{ °C}-40\text{ min}$, $T3 = 180\text{ °C}-20\text{ min}$ y $T4 = 180\text{ °C}-40\text{ min}$).

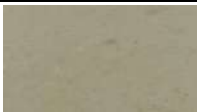
Los resultados obtenidos con el colorímetro mostraron una disminución progresiva del parámetro L^* desde el tratamiento $T1$ ($M = 90.84$, $DE = 0.94$) hasta el tratamiento $T4$ ($M = 72.33$, $DE = 3.68$), lo que indica un incremento en la oscuridad de la corteza a medida que aumentaron la temperatura y el tiempo de horneado. De manera similar, el parámetro a^* aumentó desde $T1$ ($M = 1.98$, $DE = 0.39$) hasta $T4$ ($M = 10.70$, $DE = 1.56$), evidenciando una mayor tonalidad rojiza. El parámetro b^* mostró un incremento progresivo desde $T1$ ($M = 13.71$, $DE = 0.99$) hasta $T4$ ($M = 22.65$, $DE = 1.49$), indicando un aumento de la coloración amarilla conforme se incrementaron las condiciones de horneado.

En el caso de la visión computacional, se observó una tendencia similar en los parámetros de color. El parámetro L^* disminuyó desde $T1$ ($M = 63.25$, $DE = 0.63$) hasta $T4$ ($M = 54.66$, $DE = 2.07$), mientras que los parámetros a^* y b^* aumentaron progresivamente, alcanzando sus valores máximos en el tratamiento $T4$ ($a^* = 7.21$;

b* = 49.50). Estos resultados indican que ambos métodos permiten detectar cambios en el color del pan árabe en función de las condiciones de horneado.

Tabla 29

Comparación visual del color de la corteza del pan árabe mediante fotografía, visión computacional y colorímetro según tratamiento de horneado

Tratamiento	Temp. (°C)	Tiempo (min)	Fotografía	Visión computacional	Colorímetro
T1	150	20			
T2	150	40			
T3	180	20			
T4	180	40			

El análisis de varianza factorial 2×2 realizado para los datos del colorímetro mostró que la temperatura tuvo un efecto significativo sobre el parámetro L*, $F(1, 32) = 164.42$, $p < 0.001$, al igual que el tiempo de horneado, $F(1, 32) = 43.40$, $p < 0.001$. Asimismo, se encontró una interacción significativa entre temperatura y tiempo, $F(1, 32) = 37.33$, $p < 0.001$.

Para el parámetro a*, la temperatura presentó un efecto significativo, $F(1, 32) = 124.31$, $p < 0.001$, al igual que el tiempo de horneado, $F(1, 32) = 13.84$, $p < 0.001$, y la interacción también fue significativa, $F(1, 32) = 5.16$, $p = 0.030$.

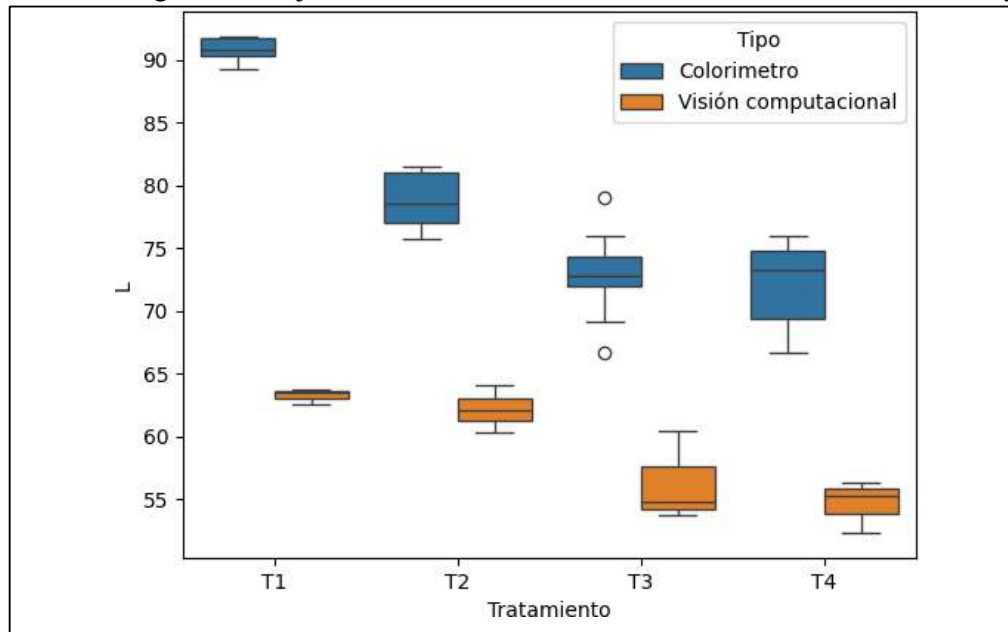
En el caso del parámetro b*, la temperatura tuvo un efecto significativo, $F(1, 32) = 90.68$, $p < 0.001$, así como el tiempo de horneado, $F(1, 32) = 13.92$, $p < 0.001$, mientras que la interacción no fue significativa, $F(1, 32) = 4.12$, $p = 0.051$.

En los datos de visión computacional, la temperatura tuvo un efecto significativo sobre L^* , $F(1, 8) = 29.76$, $p < 0.001$, mientras que el tiempo, $F(1, 8) = 1.07$, $p = 0.332$, y la interacción, $F(1, 8) = 0.04$, $p = 0.840$, no fueron significativos. Para a^* , la temperatura presentó un efecto significativo, $F(1, 8) = 46.26$, $p < 0.001$, mientras que el tiempo, $F(1, 8) = 1.77$, $p = 0.220$, y la interacción, $F(1, 8) = 2.78$, $p = 0.134$, no fueron significativos. En b^* , tanto la temperatura, $F(1, 8) = 90.44$, $p < 0.001$, como el tiempo, $F(1, 8) = 18.01$, $p = 0.003$, fueron significativos, sin interacción significativa.

Figura 19

Distribución del parámetro L^* del color de la corteza del pan árabe según tratamiento de horneado y método de medición (colorímetro y visión computacional).

Nota. El diagrama de cajas muestra la mediana, los cuartiles, los valores extremos y



la dispersión de los datos del parámetro L^* en los tratamientos T1, T2, T3 y T4.

Figura 20

Distribución del parámetro a^* del color de la corteza del pan árabe según tratamiento de horneado y método de medición (colorímetro y visión computacional).

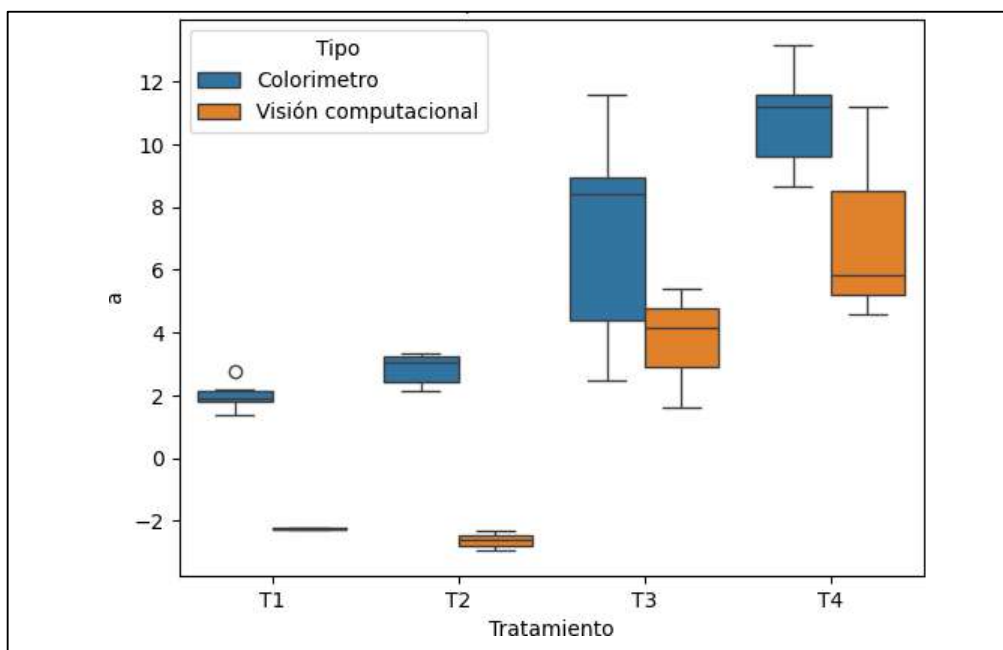
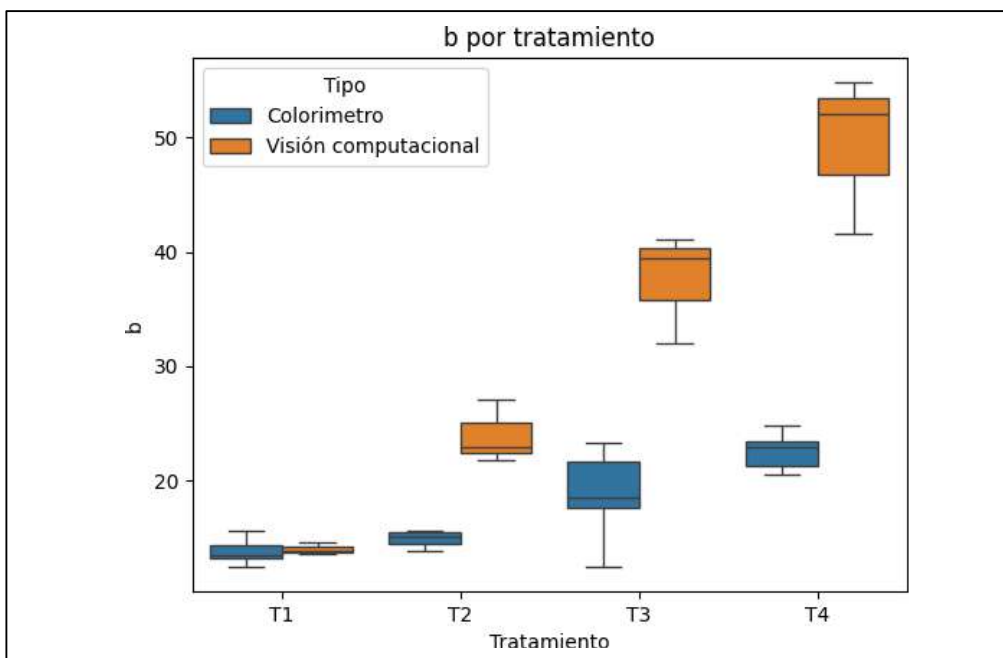


Figura 21

Distribución del parámetro b^* del color de la corteza del pan árabe según tratamiento de horneado y método de medición (colorímetro y visión computacional).



Nota. Los diagramas de cajas (Fig. 20 y 21) muestran la mediana, los cuartiles, los valores extremos y la dispersión de los parámetros a^* y b^* .

En la Tabla 30, la prueba de Tukey mostró diferencias significativas entre la mayoría de los tratamientos en el parámetro L^* del colorímetro, evidenciando que cada condición de horneado produce un nivel de luminosidad diferente, excepto entre T3 y T4. En el parámetro a^* , se observaron diferencias significativas entre todos los tratamientos, lo que indica un aumento progresivo del tono rojizo. En b^* , también se observaron diferencias significativas entre la mayoría de los tratamientos, evidenciando un incremento continuo del color amarillo conforme aumenta la temperatura y el tiempo.

En visión computacional, las diferencias significativas en L^* se observaron principalmente entre T1 y los tratamientos de mayor temperatura (T3 y T4). En el parámetro a^* , las diferencias se concentraron entre los tratamientos de baja y alta temperatura, mientras que en b^* se encontraron diferencias significativas entre casi todos los tratamientos, lo que demuestra una alta sensibilidad del análisis digital para detectar cambios en la coloración amarilla.

Tabla 30

Valores medios de L^* , a^* y b^* en pan árabe según tratamiento de horneado

Tratamiento	Temp. (°C)	Tiempo (min)	Colorímetro			Visión computacional		
			L^*	a^*	b^*	L^*	a^*	b^*
T1	150	20	90.84±0.94a	1.98±0.39a	13.71±0.99a	63.25±0.63a	-2.25±0.02a	13.94±0.52a
T2	150	40	78.73±2.30b	2.83±0.48a	14.85±0.62a	62.16±1.84a	-2.64±0.30a	23.92±2.77b
T3	180	20	72.79±3.60c	7.19±3.09b	18.76±3.58b	56.30±3.60b	3.72±1.92b	37.53±4.88c
T4	180	40	72.33±3.68c	10.70±1.56c	22.65±1.49c	54.66±2.07b	7.21±3.53b	49.50±6.96d

Nota. Medias con letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p < 0.05$).

El análisis de correlación mostró una alta relación entre el colorímetro y la visión computacional, con valores de $r = 0.87$ para L^* , $r = 0.99$ para a^* y $r = 0.99$ para b^* , lo que indica una fuerte concordancia entre ambos métodos de medición, especialmente en los parámetros cromáticos. Asimismo, el error cuadrático medio (RMSE) fue de 20.13 para L^* , 4.25 para a^* y 17.00 para b^* , mostrando que el parámetro a^* presentó la menor variabilidad entre métodos.

En general, los resultados demuestran que la temperatura y el tiempo de horneado influyen significativamente en el color del pan árabe, siendo la temperatura el factor más determinante. El tratamiento de 180 °C durante 40 minutos produjo la mayor intensidad de color y cambios en la tonalidad.

CAPITULO V. DISCUSIONES

La presente investigación permitió analizar de manera integral la relación entre la visión por computadora y la colorimetría tradicional en la medición del color de productos de panificación, así como su asociación con la percepción del consumidor y la influencia de las condiciones de horneado en la variación cromática de la corteza y la miga. Los resultados obtenidos evidencian que la visión por computadora constituye una herramienta confiable para la evaluación del color en alimentos horneados, mostrando concordancia con la colorimetría instrumental y capacidad para representar de manera adecuada la percepción visual del consumidor.

En primer lugar, el análisis de correlación entre la visión por computadora y la colorimetría mostró una relación significativa en el parámetro L^* de la corteza ($r = 0.701$; $p < 0.001$), lo que indica una concordancia moderada-alta en la medición de la luminosidad superficial del pan. Este resultado demuestra que ambos métodos son capaces de detectar cambios en el grado de pardeamiento durante el proceso de horneado, lo que confirma la validez de la visión por computadora como alternativa para la medición del color. Este hallazgo coincide con lo señalado por Goñi y Salvadori (2017) y Wu y Sun (2013), quienes reportaron que los sistemas de visión digital pueden reproducir adecuadamente los valores cromáticos obtenidos mediante colorímetros cuando las condiciones de iluminación y calibración son controladas, permitiendo evaluar el color de los alimentos de manera objetiva y reproducible.

De manera similar, el parámetro L^* en la miga presentó una correlación significativa ($r = 0.573$; $p < 0.001$), lo que evidenció una relación moderada entre ambas técnicas,

aunque menor que en la corteza. Esta diferencia puede explicarse por la estructura interna del pan, ya que la miga presenta una superficie heterogénea y porosa que genera dispersión de la luz y variabilidad en la medición cromática. Pathare et al. (2013) señalan que la medición del color en alimentos con estructuras complejas puede generar diferencias entre técnicas instrumentales debido a la textura y a la irregularidad de la superficie, lo que afecta la uniformidad de la lectura cromática. En este sentido, los resultados obtenidos no reflejan una limitación del sistema de visión por computadora, sino una característica propia del alimento evaluado.

En cuanto al parámetro a^* , el análisis global no mostró una correlación significativa entre la visión por computadora y la colorimetría ($r = 0.189$; $p = 0.316$), lo que indica una baja concordancia en la medición del componente rojo-verde. Este comportamiento puede atribuirse a la alta sensibilidad de este parámetro frente a variaciones de iluminación, textura y composición del alimento, lo que afecta la estabilidad de la medición en sistemas de captura digital. Sin embargo, en los análisis específicos por tipo de pan se observaron correlaciones altas en el pan Ciabatta y pan árabe, lo que sugiere que la precisión del parámetro a^* depende de la uniformidad de la superficie y de las condiciones de captura de la imagen. Estos resultados coinciden con estudios de Tomasevic et al. (2019) y Watkins et al. (2024), quienes señalan que la visión por computadora puede presentar variabilidad en algunos parámetros cromáticos, pero mantiene una alta precisión cuando el sistema es correctamente calibrado.

Por otro lado, el parámetro b^* presentó una correlación significativa ($r = 0.533$; $p = 0.004$), lo que evidencia una concordancia moderada entre ambas técnicas en la

medición del componente amarillo del color. Este resultado es relevante debido a que el parámetro b^* está directamente relacionado con el grado de pardeamiento en productos horneados, especialmente con la formación de compuestos derivados de la reacción de Maillard. Martins et al. (2001) y Kroh (1994) señalan que la formación de compuestos cromóforos durante el horneado genera cambios en la tonalidad amarilla y marrón del alimento, lo que permite utilizar este parámetro como indicador del grado de cocción y calidad del producto. En este sentido, la visión por computadora demostró ser capaz de detectar estos cambios cromáticos de manera consistente.

El análisis de concordancia mediante Bland–Altman permitió complementar los resultados de correlación, evidenciando que los parámetros L^* y a^* presentan sesgos moderados y límites de concordancia aceptables, lo que indica que ambos métodos pueden ser utilizados de manera complementaria en la medición del color. Sin embargo, el parámetro b^* presentó un sesgo mayor, lo que sugiere la necesidad de calibraciones adicionales en el sistema de visión por computadora para mejorar la precisión en la medición del color amarillo. Este comportamiento coincide con lo reportado por Ling et al. (1996) y Oliveira y Balaban (2006), quienes señalaron que la concordancia entre colorímetros y sistemas de visión digital depende del control de la iluminación y de la calibración del sistema.

En relación con la percepción del consumidor, los resultados de la prueba de chi-cuadrado evidenciaron una preferencia altamente significativa por la visión por computadora en la representación del color de la corteza en todos los panes evaluados ($p < 0.001$), con tamaños de efecto elevados, lo que indica que los consumidores

percibieron las imágenes digitales como más representativas del producto real. Este comportamiento puede explicarse por la capacidad de la visión por computadora para capturar la textura y la tonalidad del pan de manera más realista, lo que facilita la evaluación visual del producto. Gonzalez y Woods (2018) señalan que los sistemas de procesamiento digital de imágenes permiten representar características visuales con mayor fidelidad, lo que mejora la interpretación del color en alimentos.

En el caso de la miga, también se observaron diferencias significativas a favor de la visión por computadora, aunque con tamaños de efecto moderados, lo que indica que la preferencia del consumidor fue menor que en la corteza. Esto se debe a que la corteza es el principal atributo visual del pan y está directamente relacionada con la percepción de calidad, frescura y grado de horneado, mientras que la miga tiene una menor influencia en la evaluación visual del producto. La exclusión de la muestra PAN8 fue metodológicamente adecuada debido a que correspondía a una galleta sin estructura de miga, lo que garantizó la validez del análisis estadístico.

En cuanto a la influencia de las condiciones de horneado, los resultados del análisis de varianza y la prueba de Tukey evidenciaron que la temperatura y el tiempo influyen significativamente en el color de los tres tipos de pan evaluados, siendo la temperatura el factor más determinante. En todos los casos se observó una disminución de la luminosidad y un aumento de los parámetros a^* y b^* , lo que indica un mayor grado de pardeamiento conforme se incrementan las condiciones térmicas. Este comportamiento coincide con lo reportado por Pedreschi et al. (2005) y Martins et al. (2001), quienes señalan que la reacción de Maillard y la caramelización generan cambios progresivos en el color de los alimentos durante el tratamiento térmico.

En el pan francés, el tratamiento de mayor temperatura y tiempo produjo la mayor oscuridad y cambios cromáticos, lo que evidencia un mayor desarrollo del pardeamiento. En el pan Ciabatta se observó una tendencia similar, con una disminución progresiva de la luminosidad y un aumento de los componentes cromáticos, mientras que en el pan árabe los cambios fueron más intensos debido a su estructura más delgada, que favorece la transferencia de calor y acelera las reacciones químicas. Estos resultados demuestran que la estructura del producto influye en la evolución del color durante el horneado, lo que coincide con lo señalado por Pathare et al. (2013).

En términos generales, la integración de los resultados de correlación, chi-cuadrado, ANOVA, Tukey y Bland–Altman permitió establecer que la visión por computadora presenta una alta capacidad para medir el color de los productos de panificación y representar de manera adecuada la percepción del consumidor. La concordancia observada con la colorimetría tradicional y la sensibilidad para detectar cambios cromáticos generados por las condiciones de horneado evidencian su potencial como herramienta de control de calidad en la industria alimentaria.

Desde una perspectiva tecnológica, la visión por computadora ofrece ventajas importantes, como la reducción de costos, la rapidez en la medición, la posibilidad de automatización y la evaluación no destructiva del producto, lo que la convierte en una alternativa viable frente a la colorimetría tradicional. Wu y Sun (2013) señalan que los sistemas de visión digital permiten mejorar la eficiencia del control de calidad en alimentos, lo que respalda la aplicabilidad de esta tecnología en la industria de panificación.

CAPITULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

Se determinó que la visión por computadora presenta una relación significativa con la colorimetría tradicional en la medición del color de productos de panificación, evidenciándose concordancia en los parámetros L^* de la corteza ($r = 0.701$; $p < 0.001$), L^* de la miga ($r = 0.573$; $p < 0.001$) y b^* ($r = 0.533$; $p = 0.004$), así como una asociación altamente significativa con la percepción del consumidor ($p < 0.001$) y sensibilidad frente a las condiciones de horneado, lo que demuestra que la visión por computadora constituye una herramienta confiable, objetiva y viable para la evaluación cromática y el control de calidad en productos de panificación.

Se estableció que existe una relación significativa entre la visión por computadora y la colorimetría tradicional en la medición del color de la corteza y la miga de los productos de panificación, evidenciada mediante el análisis de correlación y concordancia, observándose asociaciones moderadas a altas en los parámetros L^* y b^* , lo que confirma que ambos métodos pueden ser utilizados de manera complementaria en la evaluación cromática de alimentos horneados.

Se comprobó que la percepción del consumidor presenta una asociación altamente significativa con la visión por computadora en la representación del color de la corteza y la miga de los panes evaluados, según la prueba de chi-cuadrado ($p < 0.001$), evidenciándose una mayor preferencia por las imágenes digitales frente a la colorimetría tradicional, lo que demuestra que la visión por computadora representa de manera más realista la apariencia visual del producto.

Se determinó que las condiciones de horneado (tiempo y temperatura) influyen significativamente en la variación del color de los productos de panificación, tanto

en la visión por computadora como en la colorimetría tradicional, evidenciándose mediante el análisis de varianza y la prueba de Tukey que el incremento de la temperatura y el tiempo de horneado produce una disminución progresiva de la luminosidad (L^*) y un aumento de los parámetros a^* y b^* en la corteza y la miga de los panes evaluados, lo que confirma que ambos métodos permiten detectar de manera consistente los cambios cromáticos generados por el proceso térmico.

Se estableció que la visión por computadora permite integrar la medición instrumental del color con la percepción visual del consumidor y las condiciones de procesamiento térmico, constituyendo una alternativa tecnológica eficiente, rápida, no destructiva y de menor costo operativo para el control de calidad en la industria de panificación.

6.2 Recomendaciones

Se recomienda calibrar los sistemas de visión por computadora mediante el uso de cartas de color estándar, cámaras de alta resolución e iluminación controlada, con el fin de mejorar la precisión en la medición de los parámetros cromáticos, especialmente el parámetro a^* , que presentó mayor variabilidad en los resultados.

Se recomienda realizar estudios futuros en entornos industriales reales que evalúen la aplicación de la visión por computadora en líneas de producción automatizadas de panificación, con el objetivo de validar su uso en el monitoreo en tiempo real del color del producto.

Se recomienda ampliar la investigación considerando otros tipos de productos de panificación, como panes integrales, panes enriquecidos, productos sin gluten y

productos precocidos, con el fin de evaluar el comportamiento del color en diferentes matrices alimentarias.

Se recomienda integrar la visión por computadora con modelos de inteligencia artificial y aprendizaje automático para desarrollar sistemas predictivos que permitan estimar el grado de horneado, la calidad del producto y la aceptación del consumidor.

Se recomienda desarrollar investigaciones que relacionen el color del pan con otros parámetros de calidad como textura, humedad, volumen específico, actividad de agua y propiedades sensoriales, con el fin de lograr una evaluación integral del producto.

Se recomienda promover el uso de tecnologías de visión por computadora en universidades y centros de investigación en ingeniería de alimentos, debido a su potencial en la automatización del control de calidad y en la modernización de la industria alimentaria.

CAPITULO VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Cauvain, S. P. (2011). Bread making: Improving quality (2nd ed.). Woodhead Publishing.
- Cauvain, S. P., & Young, L. (2018). Technology of breadmaking (3rd ed.). Springer.
- Commission Internationale de l'Éclairage (CIE). (2004). *Colorimetry*. CIE Publication 15:2004. <https://cie.co.at/publications/colorimetry-3rd-edition>
- García, R., & Mechán, J. (2022). *Optimización de las características texturales y sensoriales del pan de molde a base de harina de Prosopis pallida, Amaranthus caudatus y almidón de papa* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.unprg.edu.pe/handle/20.500.12893/10699>
- Goesaert, H., Ponte, J. G. de, Brijs, K., & Delcour, J. A. (2005). Wheat flour constituents: How they impact bread quality, and how to impact their functionality. Trends in Food Science & Technology, 16(1–3), 12–30. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2004.02.011>
- Goñi, S. M., & Salvadori, V. O. (2017). Color measurement: comparison of colorimeter vs. computer vision system. *Journal of Food Measurement and Characterization*, 11(2), 538-547. <https://doi.org/10.1007/s11694-016-9421-1>
- Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2018). *Digital image processing*. Pearson. <https://dl.icdst.org/pdfs/files4/01c56e081202b62bd7d3b4f8545775fb.pdf>
- Hunter, R. S., & Harold, R. W. (1987). *The measurement of appearance*. John Wiley & Sons. <https://books.google.ki/books?id=8nfJEAAAQBAJ&lpg=PR4&hl=es&pg=PA28#v=onepage&q&f=false>

- Kroh, L. W. (1994). Caramelisation in food and beverages. *Food Chemistry*, 51(4), 373-379.
[https://doi.org/10.1016/0308-8146\(94\)90188-0](https://doi.org/10.1016/0308-8146(94)90188-0)
- Ling, P. P., Ruzhitsky, V. N., Kapanidis, A. N., & Lee, T.-C. (1996). Correlation between color machine vision and colorimeter for food applications. *ACS Symposium Series*, 631, 253-278. <https://doi.org/10.1021/bk-1996-0631.ch023>
- Martins, S. I. F. S., Jongen, W. M. F., & van Boekel, M. A. J. S. (2001). A review of Maillard reaction in food and implications to kinetic modelling. *Trends in Food Science & Technology*, 11(9-10), 364-373. [https://doi.org/10.1016/S0924-2244\(01\)00022-X](https://doi.org/10.1016/S0924-2244(01)00022-X)
- Oliveira, A. C. M., & Balaban, M. O. (2006). Comparison of a colorimeter with a machine vision system in measuring color of Gulf of Mexico sturgeon fillets. *Applied Engineering in Agriculture*, 22(4), 583-587. <https://doi.org/10.13031/2013.21211>
- Pathare, P. B., Opara, U. L., & Al-Julanda Al-Said, F. (2013). Colour measurement and analysis in fresh and processed foods: A review. *Food and Bioprocess Technology*, 6(1), 36-60. <https://doi.org/10.1007/s11947-012-0867-9>
- Pedreschi, F., Moyano, P., Kaack, K., & Granby, K. (2005). Color changes and acrylamide formation in fried potato slices. *Food Research International*, 38(1), 1-9.
<https://doi.org/10.1016/j.foodres.2004.07.002>
- Quiroz, A. (2021). *Aplicación de técnicas de visión por computadora en la selección de palta Hass de calidad* [Tesis de licenciatura, Universidad Señor de Sipán]. Repositorio Institucional. <https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/8392>

- Real Academia Española (RAE) & Asociación de Academias de la Lengua Española (ASALE). (2014a). *Caramelización*. En *Diccionario de la lengua española* (23ª ed.). <https://dle.rae.es/caramelización>
- Real Academia Española (RAE) & Asociación de Academias de la Lengua Española (ASALE). (2014b). *Colorimetría*. En *Diccionario de la lengua española* (23ª ed.). <https://dle.rae.es/colorimetría>
- Real Academia Española (RAE) & Asociación de Academias de la Lengua Española (ASALE). (2014c). *Colorímetro*. En *Diccionario de la lengua española* (23ª ed.). <https://dle.rae.es/colorímetro>
- Real Academia Española (RAE) & Asociación de Academias de la Lengua Española (ASALE). (2014d). *Espectrofotómetro*. En *Diccionario de la lengua española* (23ª ed.). <https://dle.rae.es/espectrofotómetro>
- Tomasevic, I., Tomovic, V., Milovanovic, B., Lorenzo, J. M., Đorđević, V., Karabasil, N., & Djekic, I. (2019). Comparison of a computer vision system vs. traditional colorimeter for color evaluation of meat products with various physical properties. *Meat Science*, 148, 5-12. <https://doi.org/10.1016/j.meatsci.2018.09.015>
- Ünal Şengör, G. F., Balaban, M. O., Topaloğlu, B., Ayvaz, Z., Ceylan, Z., & Doğruyol, H. (2019). Color assessment by different techniques of gilthead seabream (*Sparus aurata*) during cold storage. *Food Science and Technology (Brazil)*, 39(3), 696-703. <https://doi.org/10.1590/fst.02018>
- Urquiza, O. (2017). *Evaluación de las características físicas y sensoriales del pan tipo molde con sustitución parcial de harina de trigo por papa nativa (Solanum tuberosum) precocida* [Tesis de licenciatura, Universidad Nacional José María

<https://repositorio.unajma.edu.pe/handle/20.500.14168/282>

Valqui, F. M., Tafur, R. P., & Huayama, P. M. (2024). *Evaluación de las características físicoquímicas y sensoriales del pan de molde enriquecido con kiwicha (Amaranthus caudatus L.) y cañihua (Chenopodium pallidicaule Aellen)*. *Revista Colombiana de Investigaciones Agroindustriales*, 10(2), 102-116.

<https://doi.org/10.23850/24220582.5943>

Watkins, K., Hastie, M., Ha, M., Hepworth, G., & Warner, R. (2024). Machine vision requires fewer repeat measurements than colorimeters for precise seafood colour measurement. *Foods*, 13(7), 1110. <https://doi.org/10.3390/foods13071110>

Wu, D., & Sun, D.-W. (2013). Colour measurements by computer vision for food quality control: A review. *Trends in Food Science & Technology*, 29(1), 5-20. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2012.08.004>

Yagiz, Y., Balaban, M. O., Kristinsson, H. G., Welt, B. A., & Marshall, M. R. (2009). Comparison of Minolta colorimeter and machine vision system in measuring colour of irradiated Atlantic salmon. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 89(4), 728-730. <https://doi.org/10.1002/jsfa.3467>

ANEXOS

ANEXO 1

CONFIGURACIÓN DEL SISTEMA DE VISIÓN POR COMPUTADORA

Figura 1

Diagrama de configuración de iluminación utilizados en la captura de imágenes para análisis de color mediante visión por computadora.

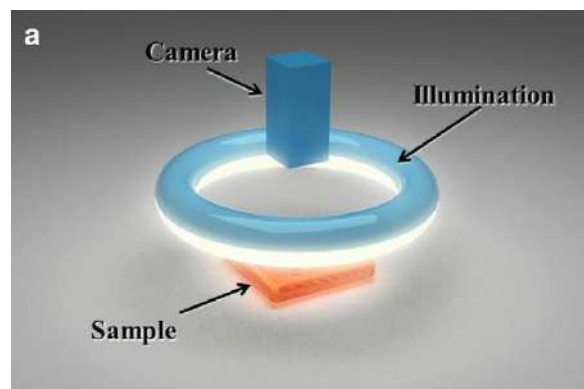
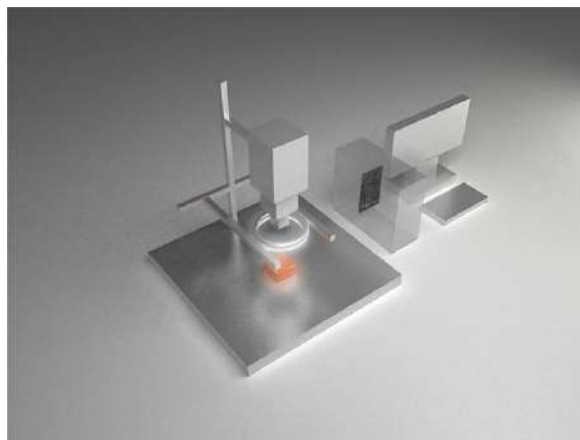


Figura 2

Diagrama esquemático del sistema de visión por computadora empleado.



Fuente: Wu et al. (2013)

ANEXO 2

FICHA TÉCNICA DEL COLORÍMETRO NH310



Nombre del equipo: Colorímetro portátil NH310

Tipo de equipo: Colorímetro triestímulo para medición de color en el espacio CIELAB

Marca: 3nh Technology Co., Ltd.

Modelo: NH310

País de fabricación: China

Aplicación: Medición del color en alimentos, productos industriales, plásticos, textiles y materiales sólidos.

Uso en la investigación: Medición de los parámetros cromáticos L^* , a^* y b^* en la corteza y miga de productos de panificación.

PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO:

El colorímetro NH310 mide el color mediante sensores triestímulo que capturan la luz reflejada por la superficie del objeto, transformándola en valores numéricos en el espacio de color CIELAB (L^* , a^* , b^*), permitiendo cuantificar la luminosidad, el componente rojo-verde y el componente amarillo-azul del producto evaluado.

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS

Parámetro	Especificación
Sistema de medición	CIELAB
Illuminante	D65
Observador estándar	10°
Geometría de medición	8/d
Apertura de medición	8 mm
Pantalla	LCD
Repetibilidad	≤ 0.10
Diferencia entre instrumentos	≤ 0.50
Fuente de luz	LED
Rango de medición	L^* , a^* , b^*
Alimentación	Batería recargable
Interfaz	USB
Temperatura de operación	0–40 °C
Humedad de operación	< 85%
Calibración	Placa blanca estándar

ANEXO 3
FORMULARIO DE GOOGLE UTILIZADO PARA LA APLICACIÓN DE LA
ENCUESTA A CONSUMIDORES

EVALUACION SENSORIAL DE MUESTRAS DE PRODUCTOS HORNEADOS

* Indica que la pregunta es obligatoria

MUESTRAS DE CORTEZAS DE PRODUCTOS HORNEADOS

¿Qué color se parece más al color real del pan que aparece en la fotografía? *

PAN-9



Colorimetro
L: 44.85
a: 10.00
b: 27.06



☐ COPAN9

Color Computacional
R: 10.20 59 8.20



☐ VCPAN9

Atrás

Siguiente

Borrar formulario

Nunca envíes contraseñas a través de Formularios de Google.

Google no creó ni aprobó este contenido - [Comunícate con el propietario del formulario](#) - [Condiciones del Servicio](#) - [Política de Privacidad](#)

¿El formulario parece sospechoso? [Informe](#)

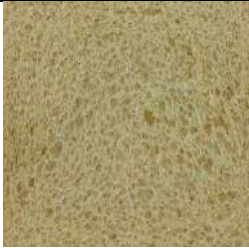
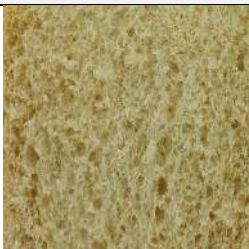
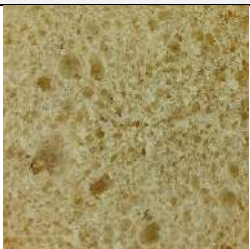
Google Formularios

110

ANEXO 4
MUESTRA DE IMÁGENES ORIGINALES DE CORTEZA UTILIZADAS EN LA
DETERMINACION DE COLOR MEDIANTE VISIÓN POR COMPUTADORA

PAN1 – PAN DE MOLDE	PAN2 - PAN INTEGRAL
	
PAN3 - PAN FRANCÉS	PAN4 - BIZCOCHO
	
PAN5 - PAN DE QUINUA	PAN6 - PAN DE SOYA
	
PAN7 - PAN DE YEMA	PAN8 - GALLETA DULCE CON CHISPAS DE CHOCOLATE
	
PAN9 - PAN CON SEMILLAS DE LINAZA	PAN10 - PAN DE MAÍZ
	

ANEXO 5
MUESTRA DE IMÁGENES ORIGINALES DE MIGA UTILIZADAS EN LA
DETERMINACION DE COLOR MEDIANTE VISIÓN POR COMPUTADORA

PAN1 – PAN DE MOLDE	PAN2 – PAN INTEGRAL
	
PAN3 – PAN FRANCÉS	PAN4 – BIZCOCHO
	
PAN5 – PAN DE QUINUA	PAN6 – PAN DE SOYA
	
PAN7 – PAN DE YEMA	PAN8 – GALLETA DULCE CON CHISPAS DE CHOCOLATE
	No presenta miga.
PAN9 – PAN CON SEMILLAS DE LINAZA	PAN10 – PAN DE MAÍZ
	

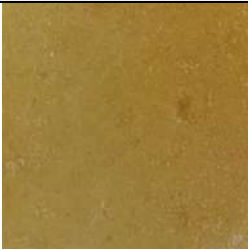
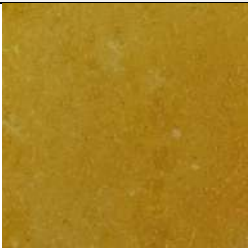
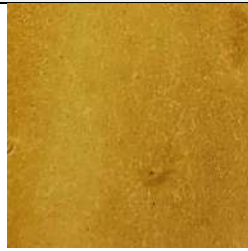
ANEXO 6
MUESTRA DE IMÁGENES ORIGINALES DE CORTEZA DE PAN FRANCES
UTILIZADAS EN LA DETERMINACION DE COLOR MEDIANTE VISIÓN POR
COMPUTADORA

TRATAMIENTO		MUESTRA 1-1	MUESTRA 1-2	MUESTRA 1-3
T1	150°C 20 min			
TRATAMIENTO		MUESTRA 2-1	MUESTRA 2-2	MUESTRA 2-3
T2	150°C 40 min			
TRATAMIENTO		MUESTRA 3-1	MUESTRA 3-2	MUESTRA 3-3
T3	180°C 20 min			
TRATAMIENTO		MUESTRA 4-1	MUESTRA 4-2	MUESTRA 4-3
T4	180°C 40 min			

ANEXO 7
MUESTRA DE IMÁGENES ORIGINALES DE CORTEZA DE PAN CIABATTA
UTILIZADAS EN LA DETERMINACION DE COLOR MEDIANTE VISIÓN POR
COMPUTADORA

TRATAMIENTO		MUESTRA 1-1	MUESTRA 1-2	MUESTRA 1-3
T1	150°C 20 min			
TRATAMIENTO		MUESTRA 2-1	MUESTRA 2-2	MUESTRA 2-3
T2	150°C 40 min			
TRATAMIENTO		MUESTRA 3-1	MUESTRA 3-2	MUESTRA 3-3
T3	180°C 20 min			
TRATAMIENTO		MUESTRA 4-1	MUESTRA 4-2	MUESTRA 4-3
T4	180°C 40 min			

ANEXO 8
MUESTRA DE IMÁGENES ORIGINALES DE CORTEZA DE PAN ÁRABE
UTILIZADAS EN LA DETERMINACION DE COLOR MEDIANTE VISIÓN POR
COMPUTADORA

TRATAMIENTO		MUESTRA 1-1	MUESTRA 1-2	MUESTRA 1-3
T1	150°C 20 min			
TRATAMIENTO		MUESTRA 2-1	MUESTRA 2-2	MUESTRA 2-3
T2	150°C 40 min			
TRATAMIENTO		MUESTRA 3-1	MUESTRA 3-2	MUESTRA 3-3
T3	180°C 20 min			
TRATAMIENTO		MUESTRA 4-1	MUESTRA 4-2	MUESTRA 4-3
T4	180°C 40 min			

ANEXO 9

SOFTWARE UTILIZADO PARA EL PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

Para el procesamiento de las imágenes de los productos horneados se utilizó el lenguaje de programación Python, el cual permitió analizar los valores de color obtenidos mediante visión por computadora y compararlos con los valores registrados por el colorímetro.

Característica	Descripción
Lenguaje de programación	Python
Tipo	Software libre
Plataforma	Multiplataforma
Aplicación	Análisis de datos e imágenes
Interfaz	Entorno de programación
Licencia	Open Source
Uso científico	Sí
Automatización	Sí
Procesamiento de imágenes	Sí
Análisis de datos	Sí
Librería	Función
NumPy	Procesamiento numérico
Pandas	Manejo de datos
Matplotlib	Visualización de resultados
Pillow	Procesamiento de imágenes
Scikit-image	Conversión de color
Openpyxl	Lectura de archivos Excel

El programa desarrollado permitió cargar las imágenes de los panes, extraer los valores promedio de color en formato RGB, procesar los datos cromáticos obtenidos mediante colorimetría (L^* , a^* , b^*), convertir los valores al mismo espacio de color para su visualización y generar archivos de comparación entre ambos métodos de medición.

El sistema fue ejecutado en un entorno de análisis de datos, permitiendo automatizar el procesamiento de imágenes, organizar los resultados en tablas y generar salidas gráficas que facilitaron la comparación entre visión por computadora y colorimetría tradicional.

ANEXO 10

VISTAS FOTOGRÁFICAS DE LAS ACTIVIDADES DESARROLLADAS DURANTE LA INVESTIGACIÓN

a) Recepción y organización de muestras de pan adquiridos del mercado local



b) Medición de color en muestras mediante colorímetro y visión computacional



c) Amasado, moldeado y horneado de pan francés, Ciabatta y árabe



d) Validación sensorial de técnica de medición de color

